

	<h1 style="text-align: center;">상용 프로그램을 이용한 유동소음해석</h1> <p style="text-align: center;">김영남* · 이덕주** (*에이티이에스(주), **한국과학기술원)</p>
--	--

1. 서론

상용 CFD 프로그램을 통한 유동해석은 현재 산업체, 연구소에서 일반화된 해석 도구로 여겨지고 있다. 상용 CFD 프로그램이 일반화된 이유는 안정화된 solver, 메시 생성 기술의 급속한 발전, 그리고 컴퓨터 기술의 발전에 따라 산업 현장의 복잡한 문제를 해석할 수 있게 되었다는 점에서 찾을 수 있다. 최근 이러한 주변 기술의 발전과 환경친화적, 인간공학적 제품설계의 요구 사항들은 상용 CFD 프로그램 개발 회사들이 소음해석 모듈개발에 박차를 가하는 계기가 되었다.

현재 국내 산업체나 연구소에서 유동소음해석을 위하여 상용 CFD를 활용하는 영역은 자동차, 전기전자, 항공우주, 조선분야의 다양한 문제로 매년 활용도가 증가하고 있는 추세이다.

이 글의 목적은 전세계 산업체, 연구소, 학교에서 많이 사용되고 있는 미국 Fluent 사의 상용 CFD 프로그램인 FLUENT와 국내 KAIST에서 개발된 웬소음 전용해석 프로그램인 FanNoise를 사례로 상용 프로그램을 이용한 소음해석의 적용 범위와 특성, 국내외 유동소음해석 사례를 설명하여 상용 프로그램의 활용도를 높이고, 현재로서의 한계를 명확하게 하는 것이다.

2. 본론

현재 상용 CFD 프로그램은 유동 소음해석을 위하여 크게 세 가지의 기능을 제공하고 있다.

첫째, 기존의 hyperbolic형 압축성 Navier-Stokes 방정식의 해석 프로그램으로 소음을 직접 해석하는 CAA(computational aeroacoustics).

둘째, 유동해석 결과를 선형 파동방정식의 소음원으로 이용하는 acoustic analogy 방법.

셋째로 정상상태 난류유동해석 결과를 활용하여 난류소음과 유동경계층소음의 강도 및 소음원의 위치를 예측하는 기능이다.

그 밖에 웬과 같이 산업현장 및 일상 생활에 주 소음원인 회전체에 대한 소음해석을 위한 특수한 모듈을 추가하는 경우도 있다.

마지막으로 상용 CFD 프로그램이 제공하는 것은 유동해석을 통하여 해석된 소음원을 전문 음향장 해석 프로그램에 전달하는 기능을 포함한다.

이러한 상용 CFD 프로그램의 기능들은 해석 대상에 따라 적절한 방법을 선택하거나 몇 가지의 기능을 함께 사용하게 된다. 예를 들어 관이나 덕트 유동, 캐비티 유동과 같이 소음이 유동 구조에 직접적이고 강항 영향을 줄 경우 CAA 방법과 acoustic analogy 방법을 동시에 사용해야

된다.

여기서 열거했던 유동소음해석 기능은 일반적인 내용이며 상용 CFD 프로그램의 종류에 따라 기능상 차이를 갖고 있다.

3. 상용 CFD 프로그램의 CAA 기능

CAA는 압축성 Navier-Stokes 방정식을 직접 해석하는 방법으로 주로 근접 소음장 해석에 적용된다.

현재 국내산업체의 상용 CFD 프로그램이 이용한 CAA 적용문제는 머플러, 헬름홀쯔 공진기와 같은 소음장치들, 엔진 흡배기 장치 해석을 들 수 있다.

상용 CFD 프로그램에서는 CAA를 위하여 다음과 같은 몇 가지 필요기능을 포함하고 있다.

- 비반사 경계조건 : 해석 영역 밖으로 빠져 나가는 웨이브 조건과 들어오는 조건을 판단하여 경계면에서 웨이브 반사를 제거해주는 기능이다. 그림 1은 웨이브가 사각형의 해석 영역에서 비반사 경계조건을 사용하여 반사되지 않고 해석 영역 밖으로 방사되는 것을 보여주고 있다.

- Dynamic mesh adaptation : 해석 결과에 따라 메시가 자동적으로 재 생성되어 해석 결과의 해상도를 높여주는 기능이다. 그림 2는 덕트를 통과하는 이동충격파의 진행에 따라 해석 격자가 자동적으로 밀집되는 것을 보여 주고 있다.

- 병렬처리 : 소음해석은 근본적으로 비정상 상태 해석이고, 산업체에서 만나게 되는 문제의 경우 복잡한 형상 때문에 많은 해석 시간이 소요된다. 따라서 해석 시간을 줄여 줄 수 있는 병렬처리, 수렴가속화 기법이 포함되는 것이 필요하다. 그림 3은 병렬처리 수에 비례하여 해석수행시간이 줄어드는 가장 이상적인 병렬처리 성능을 보여주고 있다.

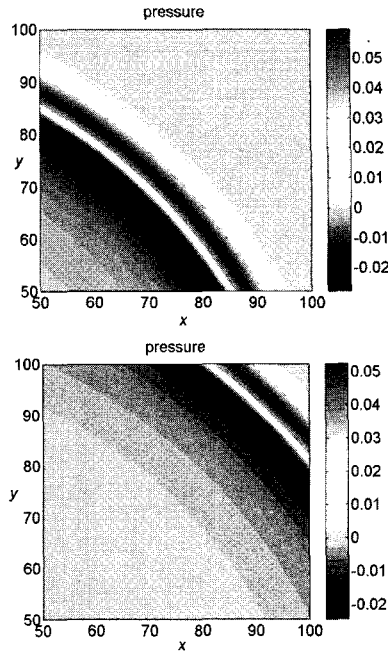


그림 1 비반사 경계조건 검증

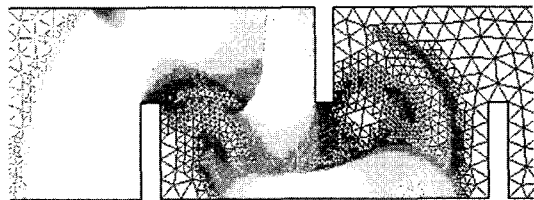


그림 2 이동 충격파에 따른 dynamic mesh adaptation

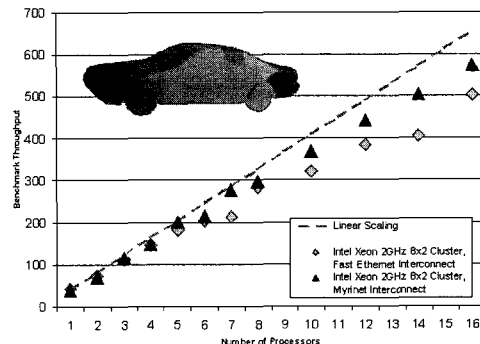


그림 3 병렬처리에서 프로세서 수와 스피드 업의 관계

4. 상용 CFD 프로그램을 이용한 CAA 응용 사례

4.1 사이드윈도우버피팅 해석

사이드윈도우버피팅(Side window buffeting)은 주행 중인 차량의 옆 유리를 약간 열었을 때 발생하는 저주파 압력 맥동이다. 특히 뒷좌석 옆 유리를 열었을 때 운전자는 쉽게 사이드윈도우버피팅 현상을 느낄 수 있다. 발생 원인은 헬름홀츠 공진기의 공진과 유사하여 승용차 실내의 공간 크기, 탑승자의 수, 그리고 창문의 열림 정도에 따라 공진주파수가 결정되는데 승용차의 경우 대략 20 Hz이고, 운전석에서 느끼는 압력 맥동이 100 dB 이상인 것으로 알려져 있다. 그림 4은 자동차회사인 DaimlerChrysler사의 엔지니어가 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 사용하여 해석한 차

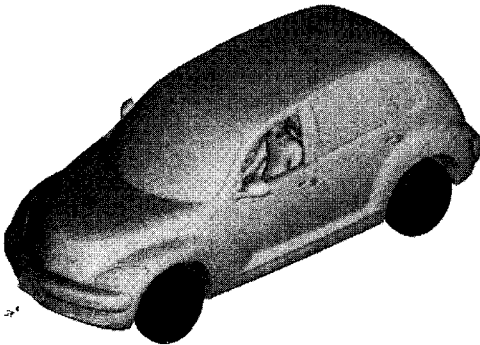


그림 4 해석에 사용된 차량 모델

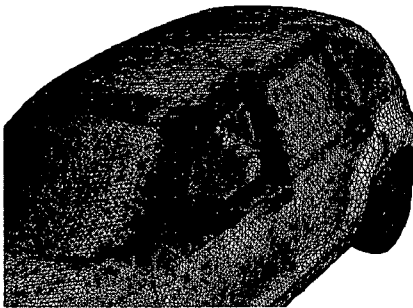


그림 5 해석을 위한 차량 표면의 해석 격자

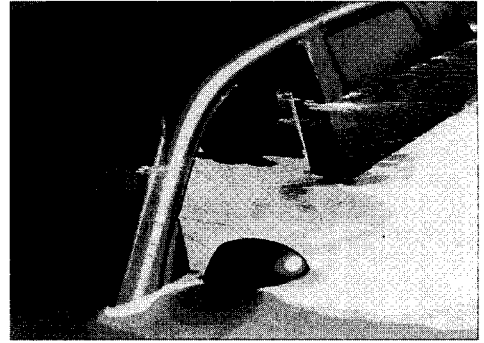


그림 6 운전자 가슴 위치에서의 속도 및 압력 분포

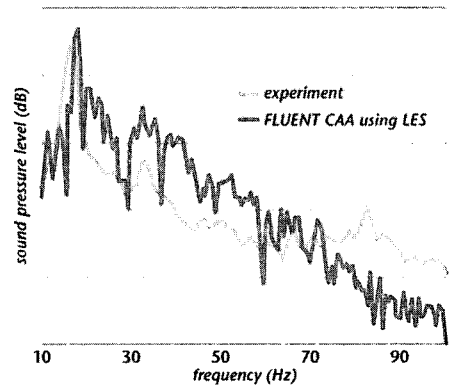


그림 7 운전자 귀 위치에서의 실험 및 해석 압력 맥동 값 비교

량 형상이다. 그림 5는 해석 수행에 사용된 차량 표면의 격자를 보여주고 있다. 사이드윈도우버피팅은 특성상 차량실내와 운전자를 해석영역에 포함시켜야 한다. 해석에 사용된 전체 해석 격자는 대략 250만 개이며 6개의 CPU를 사용하여 7일 동안 해석을 수행하였다. 그림 6은 유동해석 결과로 속도와 압력 선도를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 것처럼 열린 사이드윈도우 상에 압력맥동과 유동의 유출입을 볼 수 있다. 그림 7은 운전석에서 압력 맥동에 대한 실험결과와 CFD 해석 결과를 보여주고 있다. 실험과 해석 결과 모두 17 Hz 부근에서 버피팅 주파수가 존재하는 것을 보여주고 있으며 압력 맥동의 크기도 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다⁽¹²⁾.

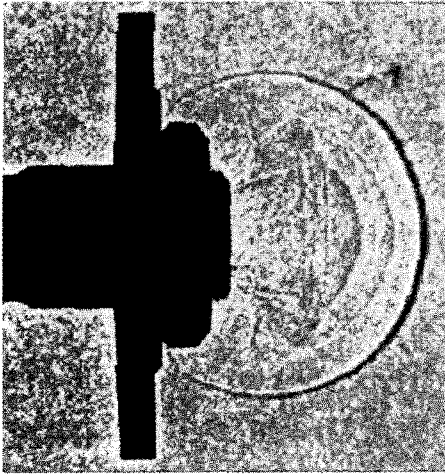


그림 8 탄환이 출구를 벗어나기 350마이크로 초 전에서의 새도우그래프 이미지

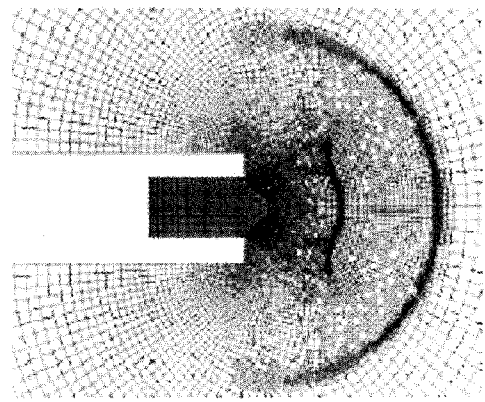


그림 10 탄이 출구를 벗어나기 350 마이크로 초 전에서의 adapted mesh

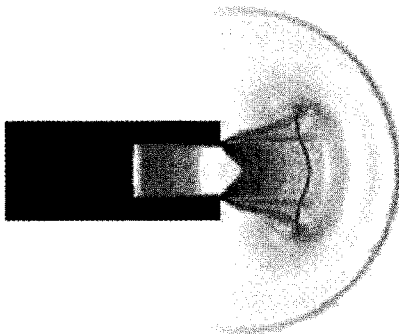


그림 9 탄환이 출구를 벗어나기 350 마이크로 초 전에서의 Fluent 해석결과(밀도)

교하였다¹⁾. 그림 8은 탄환이 출구를 벗어나기 350마이크로 초 전에서의 새도우그래프 이미지를 보여주고 있다.

그림 9는 동일 시간에서 Fluent의 압축성 해석 기능을 이용한 유동해석결과를 보여준다. 그림 8과 비교하여 충격파의 구조가 매우 유사한 형태를 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 동일 시간에서 충격파의 해석결과에 따라 자동적으로 재생성된 해석격자의 구조를 보여주고 있다. 이 문제의 경우 충격파의 진행에 따라 해석 격자의 수가 자동적으로 증감하는 자동 적응 격자 기능이 해석결과를 질을 높이고, 불필요한 해석격자를 줄여 해석시간을 단축시키는 중요한 요소임을 알 수 있다.

4.2 7.62 mm NATO G3 Rifle총의 탄환 발사에 따른 충격소음해석

탱크나 대포의 포탄 발사 시에 포 반동을 줄여 주고 고온의 불완전연소가스를 확산시키기 위하여 muzzle brake를 사용하게 된다. 이 경우 고압의 충격 소음이 발생하게 되는데, 미국방부 산하의 Benet 연구소는 muzzle brake 설계에 상용 CFD 프로그램을 사용하여 비정상상태 충격파의 전파를 해석하고 있다. 그 일환으로 7.62 mm NATO G3 rifle에 대한 CFD 해석을 수행하여 실험과 비

5. Acoustic Analogy 방법을 이용한 유동소음해석

Acoustic analogy 방법은 Lighthill 이래로 소음방사와 소음원을 분리하여 처리하는 장점 때문에 상용 CFD 프로그램에서 많이 사용되고 있다. 청취자 위치까지 유동소음을 직접 해석하지 않는 이유는 소음을 유발하는 소음원인 유동과 소음

의 물리적 특성이 다르기 때문에 발생하는데 상용 CFD 프로그램이 acoustic analogy 기법을 많이 사용하는 원인은 다음과 같다.

첫 번째 이유는 일반적으로 청취 점의 위치는 소음원으로부터 멀리 떨어져 있다.

두 번째 이유는 소음의 크기에 관련한 문제로 80 dB는 매우 시끄러운 소리로 분류하지만 압력의 크기는 0.2 Pa 정도로 직접 해석할 경우 수치적 오차와 구별할 수 없는 정도의 값이다.

세 번째 이유는 물리적 특성길이 문제로 관심 소음 주파수 영역의 소음 특성길이와 유동의 특성길이와 아주 달라서 CAA를 적용할 경우 유동과 소음 해석을 동시에 만족시키는 위한 해석 격자 구성이나 해석 영역을 결정하는데 어려움이 존재한다.

따라서 현재 일반적인 유동소음해석 방법은 소음원 근방에서만 CAA를 사용하고, 일반적인 유동소음 해석은 acoustic analogy 방법을 사용하고 있다.

상용 CFD 프로그램에서는 Navier-Stokes 방정식에서 질량보존 방정식과 운동방정식을 조합하여 구성된 Lighthill 방정식으로부터 출발하여, 벽면의 압력정보만을 이용하게 되는 Curle 방정식, 회전체나 물체의 이동을 고려할 수 있는 FW-H(Ffowcs-Williams-Hawkings) 방정식 등을 사용하고 있다. 이들 방정식의 특징은 그린 함수 형태로 소음의 방사조건을 만족하고 있다. 이 중 가장 일반적인 FW-H 방법의 특징은 소음원의 이동으로 인한 도플러 효과를 고려할 수 있어 헬리콥터 같은 회전체 소음해석에 사용할 수 있으며, 소음해석을 위한 적분면을 고체 벽면에 설정할 수 있을 뿐만 아니라 해석 영역의 임의 위치에 설정할 수 있도록 되어 있어 난류와 같은 사극소음원(quadrupole)의 영향을 소음해석에 고려할 수 있도록 되어 있다.

유동소음해석 절차는 우선 비정상상태 유동해석을 수행하면서 소음해석을 위한 유동해석의

압력, 속도 정보를 매시간 저장한다. 유동해석 종료 후 청취 점을 설정하고, 그 위치에 대한 소음 해석을 수행한다.

Fluent에서는 측정 점에서의 소음에 대한 크기, 음향 파워, spectral density, 소음의 주파수 분석, A, B, C weighting, 옥타브, 1/3 옥타브 밴드 해석, 그리고 소음원의 공헌도와 같은 보조적인 기능을 제공하고 있다.

6. Acoustic Analogy 방법의 응용사례

6.1 Landing Gear 소음해석

중형 항공기에서는 고양력 장치가 일반적으로 착륙 시에 주 소음원이나 보잉 777과 같은 대형 항공기에서는 랜딩기어소음이 더 큰 소음원으로 알려져 있다. Fluent 사에서는 보잉 757 랜딩기어의 10배 축소 모델에 대한 해석을 수행하였다. 동일 모델에 대하여 Penn State⁽⁴⁾, NASA Langley^(5,6)에서 CFD 해석을 수행하였다. Fluent에서는 NASA Langley에서 제공한 랜딩기어 형상에 대하여 LES(large eddy simulation), DES(detached eddy simulation) 난류모델을 사용하여 마하 수 0.2

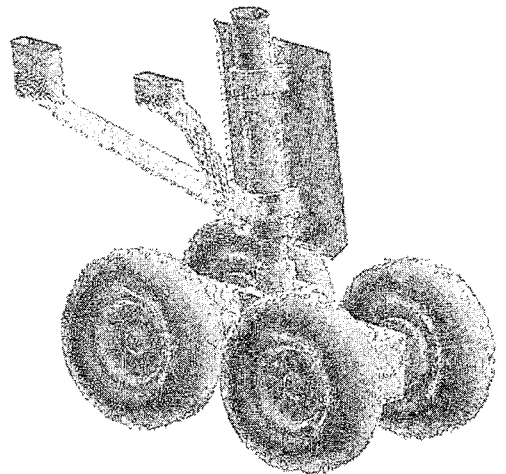


그림 11 랜딩기어 표면의 해석 격자

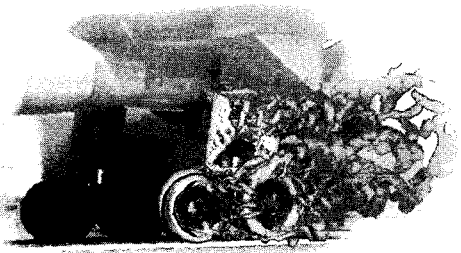


그림 12 와류 강도에 대한 유동해석 결과

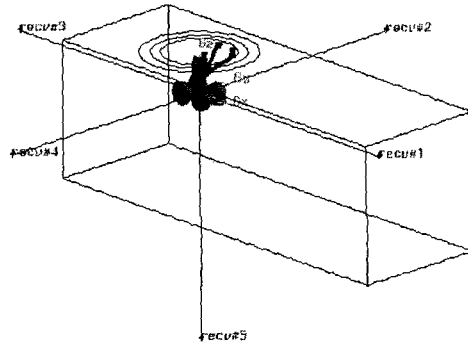


그림 14 청취 점들의 위치(바퀴 지름의 10배 거리)

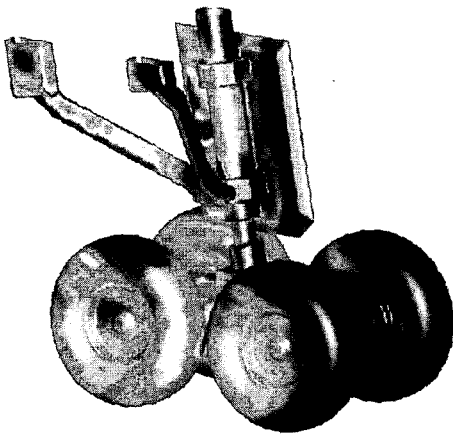


그림 13 랜딩기어 표면의 이극소음원 강도 분포(압력의 시간 미분 값의 rms값)

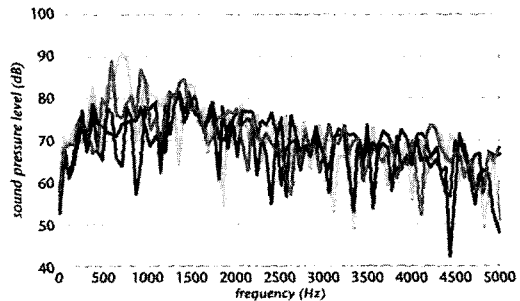


그림 15 랜딩기어 전후, 좌우의 관측 점에서 소음 크기 비교

로 해석을 수행하였다. 그림 11은 해석에 사용한 랜딩기어 표면의 해석격자를 보여 주고 있다.

유동해석을 충분히 수행한 후 랜딩기어 바퀴 지름의 10배 거리의 청취 점에서 소음의 크기를 해석했다.

그림 12는 유동해석 결과로 와류 강도의 크기를 나타내는 결과이다. 그림 13은 랜딩기어 표면의 이극소음원의 크기를 나타내는 그림으로 후방 strut에 강한 소음원이 존재하는 것을 알 수 있다. 그림 14는 해석공간과 청취 점을 나타내는 그림이다. 그림 15는 FW-H 방법을 사용하여 랜딩기어 전후방과 좌우측면의 청취 점에서 소음크기를 비교한 그림으로 대략 700 Hz에서 최고점이 있으며 좌우측면의 소음이 대략 4 dB정도 큰

것을 보여준다. 해석결과는 참고문헌 (5) 및 (6)과 매우 유사한 결과를 보여주고 있다.

6.2 사이드 미저 소음해석

최근 차량 설계 및 제작기술의 발전에 따라 엔진, 변속기, 타이어에서 발생하는 소음은 꾸준히 줄어들고 있어 전체 소음에서 유동소음의 중요성이 점차 증가하고 있다. 특히 100 km/hr ~ 120 km/hr 이상의 주행속도에서 바람소리가 엔진 및 도로 주행소음 보다 소음의 주된 원인이 되고 있다. 최근 국내에서도 자동차회사, 자동차 부품회사를 중심으로 SVM(side view mirror), wind shield wiper 등 차량외부 장착 물에 대한 소음해석을 수행하여 설계에 적용하고 있으며 유동 간섭 고려하기 위하여 장착 물이 부착된 전체 차량형상을

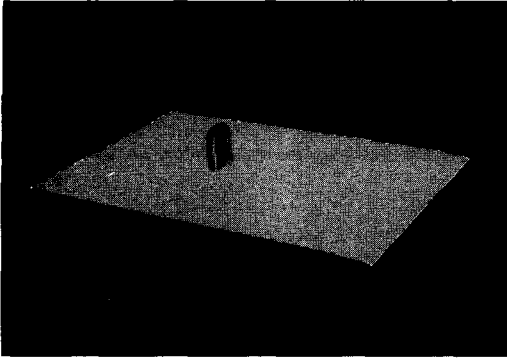


그림 16 유동소음 검증을 위하여 사용된 단순 형상의 사이드 윈도우 미러

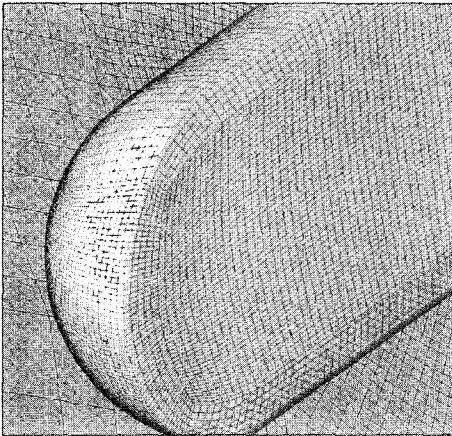


그림 17 사이드 미러 표면의 해석 격자

대상으로 해석을 수행하고 있어 해석 격자가 대략 4~5백만에 이르고 있다. 최근 CFD 및 유동 소음해석 검증을 위하여 평판에 단순한 미러 형상을 장착하여 실험을 수행하였다^(7,8).

그림 16은 실험에 사용된 것과 동일한 형상으로 유동해석 및 유동소음해석을 위하여 사용되었다. 해석은 Fluent 사에서 두 단계로 이루어졌는데 200 km/hr 자유흐름 조건에서 CAA 방법과 FW-H 방법 의한 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 청취 점들은 미러 끝점에서 0.35 m 거리 안에서 11 점을 설정하여 비교하였다.

그림 17은 미러 표면의 해석 격자를 보여 주고

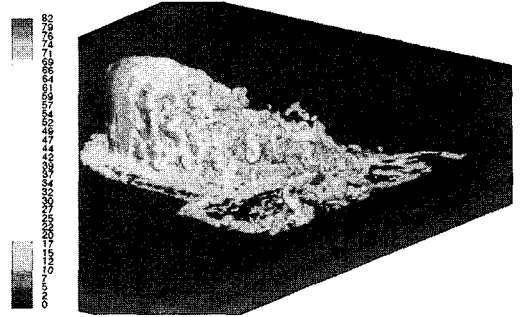


그림 18 사이드 미러 주변의 외류 강도

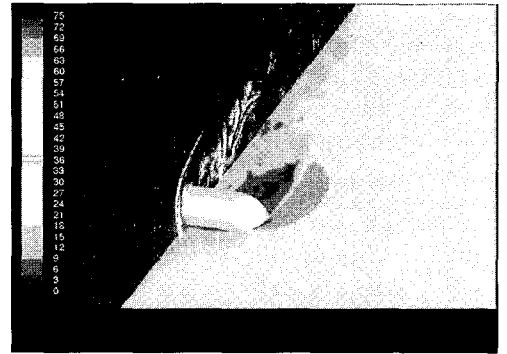
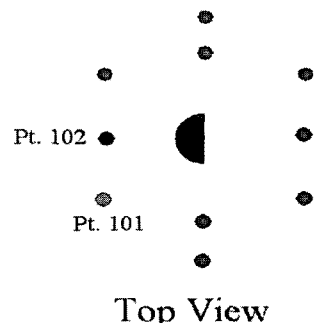


그림 19 사이드 미러 중앙 단면에서의 속도와 압력 변화



Top View

그림 20 사이드 미러 소음의 청취 점들

있다. 전체 해석영역은 100만개의 육면체 격자를 사용하였다. 그림 18은 유동해석 결과로 사이드 미러 주변의 외류강도 분포를 보여주고 있다.

그림 19는 사이드 미러 중앙 단면에서 순간적

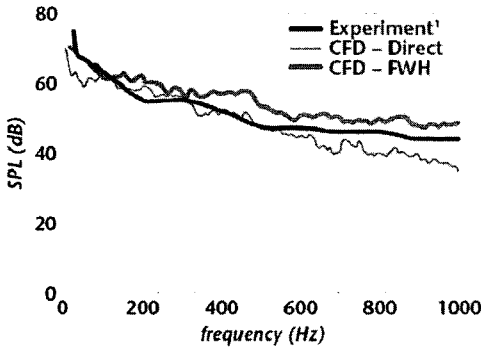


그림 21 청취 점 101에서의 소음해석과 실험 비교

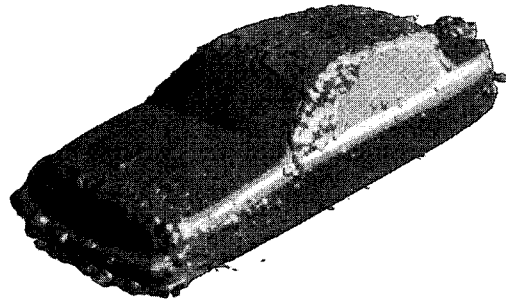


그림 22 세단 주변의 wind noise source 분포(Lilley의 acoustic source)

속도 및 압력 분포를 보여 주고 있다. 평판상에서 미러를 통과하는 유동의 후류가 규칙적으로 형성되는 것을 알 수 있다. 그림 20은 실험과 해석에 사용된 청취 점을 나타내며 그림 21에서 청취 점 101에서의 CAA, FW-H 그리고 실험 결과를 비교하였다. 실험결과와 비교하여 해석결과가 주파수에 따른 변화가 다소 심하게 나타나는 것을 제외하고 대체적으로 유사한 결과를 보여주고 있다.

7. Broad Band 소음원

지금까지는 비정상상태 유동해석으로부터 소음을 해석하는 방법을 설명하였다. 그러나 산업 현장에서는 청취 위치에서의 소음 평가보다 소음원의 위치와 소음원의 강도를 빠른 시간에 파악하는 것이 제품설계에 더 중요한 정보일 경우가 많다. 소음의 특성이 광역소음일 경우 소음원의 위치, 강도는 정상상태 난류 유동 해석 결과로부터 어느 정도 정확하게 평가하거나 예측하는 방법이 가능하다.

Fluent에서는 난류 소음 강도 예측을 위하여 등방성 난류 가정으로부터 출발하여 소음에너지를 평가하는 Proudman 방법, 유동경계층 소음원 평가, Ribner와 Goldstein 방법을 이용한 난류 제트 소음원 평가, 그리고 Lilley 방정식의 생성항

크기를 유동해석 결과로부터 구하여 사극소음원의 위치 및 강도를 예측할 수 있는 기능을 갖고 있다.

그림 22에서는 Lilley 방정식의 소음 생성항을 Fluent의 정상상태 난류 해석으로부터 구하여 보여주었다. 자동차 소음원으로 잘 알려져 있는 A-Pillar 영역이 주 소음원임을 소음원 해석으로부터 확인 할 수 있다.

8. 웬 소음

산업체에서 많이 사용하는 회전체에 대한 소음은 유동해석의 어려움 그리고 소음원의 회전 때문에 그 중요성에 비교하여 해석에 어려운 점이 있어왔다. Fluent와 같은 상용 CFD 프로그램에서는 이러한 회전체에 대한 소음 해석을 위하여 추가적인 기능으로 제공하고 있으며, 또한 국내 독자 개발 프로그램인 FanNoise와 같은 웬소음 전용 해석 프로그램이 등장하고 있다.

웬소음 해석은 주변 덕트나 구조물이 없이 자유공간으로 소음이 전파되는 경우, 그리고 주변 구조물에 의한 소음 반사, 산란 등을 고려하여 소음을 해석하는 경우로 나눌 수 있다. 일반적으로 상용 CFD 프로그램에서는 전자와 같이 자유공간으로의 소음방사만을 다루는 경우가 대부분이며, 웬소음 전용 프로그램의 경우 내부에

특집

BEM(boundary element method)와 같은 소음해석 기능을 포함하고 있어 소음 반사, 산란 등을 고려할 수 있다.

8.1 Gutin Noise

주변 구조 물이 없이 자유공간으로 회전체의 소음이 방사될 경우는 비교적 쉽게 유동소음해석을 수행할 수 있다. 그림 23은 미국 해군 선박에 사용되는 스크류로 3000 rpm 회전 시 웬소음을 해석하였다. 정상상태 난류유동해석을 수행한 후 브레이드 표면의 압력 정보를 이용하여 청취 점에서의 소음을 해석하게 된다. Fluent에서는 이 경우 회전하는 소음원에 대해 Gutin 방정식을 사용하여 소음을 해석하고 있다. 1차 BPF(blade

passage-frequency)는 200 Hz로 그림 24에서 보여 주는 것처럼 Fluent의 해석 결과가 웬의 1,2,3차 BPF(blade passage frequency)를 잘 예측하는 것을 볼 수 있다.

8.2 Sliding Mesh 기능을 이용한 웬 소음

Gutin 소음은 실제 웬의 회전을 고려하지 않기 때문에 브레이드 주변의 복잡한 비정상상태 유동 효과를 고려하지 못한다. 이 경우 sliding mesh 기능을 이용하여 매 시간 웬을 회전시켜 웬 소음을 해석할 경우 Gutin 소음과 비교하여 비정상상태 유동 및 난류 효과를 반영할 수 있어 좀더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 그림 25는 2000 rpm으로 회전하는 공조용 4개 브레이드 웬으로 1차

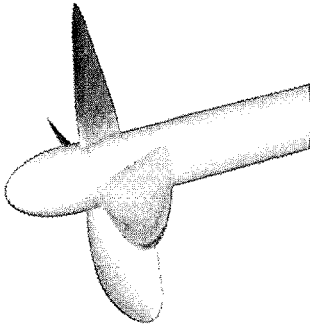


그림 23 해석에 사용한 4 브레이드 선박용 스크류

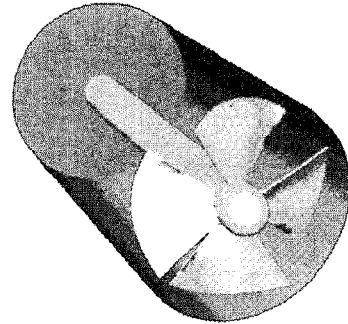


그림 25 해석에 사용한 공조용 4 브레이드 웬의 형상 및 유동해석 결과

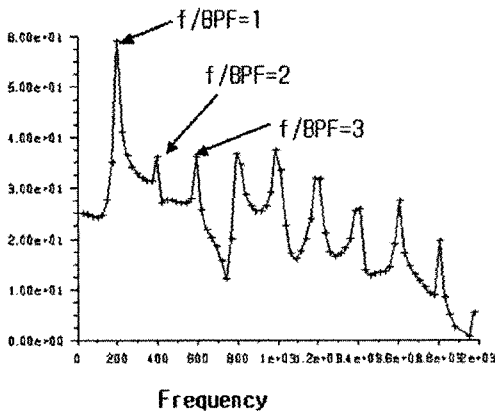


그림 24 자유공간에서 Gutin 방법을 이용한 청취점의 소음해석 결과

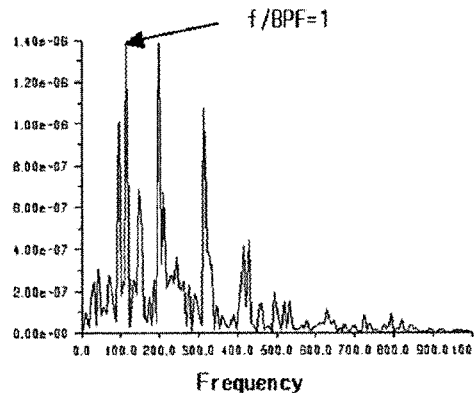


그림 26 Sliding mesh 기법과, FW-H 방법을 이용한 청취 점의 소음해석 결과

BFP가 133 Hz이다. Sliding mesh 기법을 이용하여 비정상상태 유동해석을 수행하고, 회전체에도 사용 가능한 FW-H 방법을 이용하여 청취 점에서 소음을 해석하였다. 그림 26에서 청취 점의 소음 해석 결과를 보여주고 있으며, Gutin 방법과 비교하여 비정상상태 유동 효과가 웬 소음에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

8.3 웬 소음 전용 해석 프로그램

현재 상용 CFD 프로그램에서 웬 소음은 자유 공간에 대한 소음 방사만을 해석할 수 있으며, 덕트 내부에 웬이 장착된 경우처럼 반사나 덕트 끝에서 소음의 산란 등을 고려하기 어렵다. 내부에 BEM 해석 기능을 포함하고 있는 FanNoise는 임

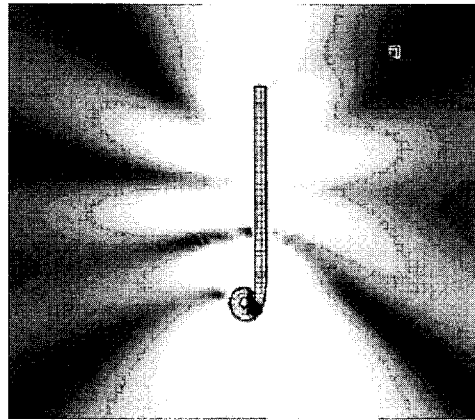


그림 29 원심웬 덕트에서의 음향장 해석 결과

펠러나 로터의 공력음원이 케이싱이나 덕트를 통해 방사, 산란될 경우의 음장을 해석할 수 있다. 덕트를 포함한 일반적인 원심웬의 유동과 소음장을 해석하기 위해서 Neise의 원심웬과 비교하였다⁽⁹⁾. 그림 27은 참고문헌 (9)의 실험에 사용한 원심웬 형상을 보여 주고 있다. 그림 28은 덕트가 없는 경우의 소음과, 덕트를 고려한 소음을 실험과 비교한 결과이다. 덕트를 고려하지 않은 경우 실험과 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 29는 덕트 내부와 외부의 음향장 해석 결과를 보여 주고 있다.

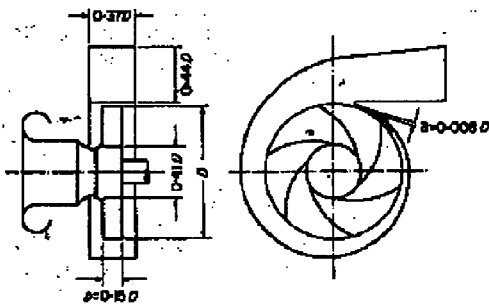


그림 27 Neise의 원심웬 실험⁽⁹⁾

9. 소음원 Export 기능

Acoustic analogy 방법에 의한 소음해석은 편리한 측면과 함께 소음반사, 산란 등의 문제를 해결할 수 없는 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 상용 CFD 프로그램을 소음원 해석을 위해서만 사용하고, 상용프로그램에서 해석된 유동 정보를 매시간 저장하여 음향장 전용 해석 프로그램에 입력하여 소음을 해석하는 방법이 있다. Fluent에서는 비정상상태 유동해석 결과를 Sys-Noise(LMS사) 같은 음향장 전용 해석 프로그램에 전달하는 기능을 갖고 있다. Sys-Noise에서는

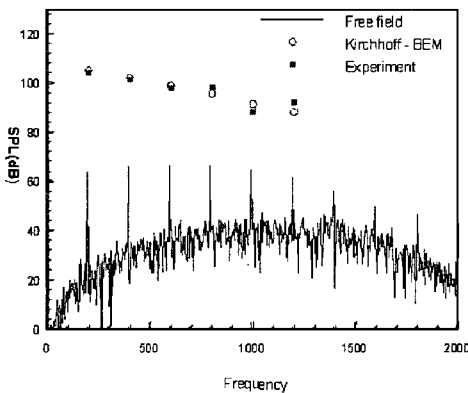


그림 28 Free field, Kirchhoff-BEM과 실험과의 비교



그림 30 Fluent를 이용한 사이드 윈도우 미러

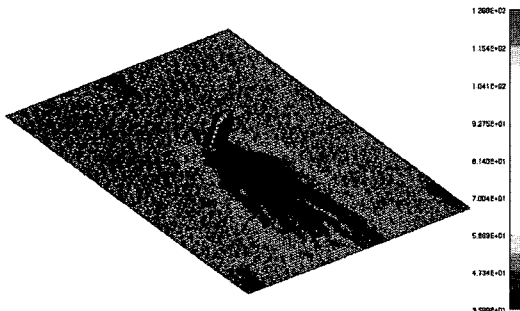


그림 31 사이드 윈도우 미러의 이극소음원 분포

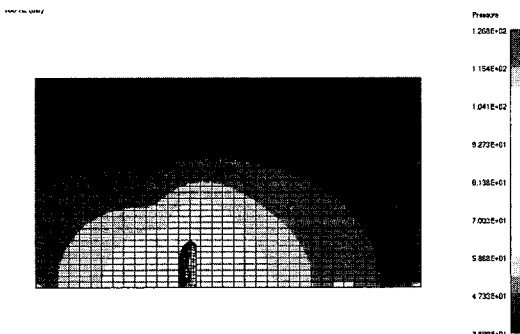


그림 32 Fluent의 유동해석결과를 이용하여 Sys-Noise에서 해석한 사이드 윈도우 미러의 음향장


Fluent에서 전달 받은 해석결과를 FFT를 통하여 주파수 영역으로 바꾸어 음향장을 해석하게 된다. 그림 30은 Fluent에서 해석한 사이드 윈도우 미러의 비정상상태 해석결과를 보여주고 있으

며 그림 31은 Sys-Noise에서 소음원으로 사용하게 되는 이극소음원 분포를 보여주고 있다.

그림 32는 Fluent로부터 입력된 이극소음원을 이용하여 Sys-Noise에서 해석된 미러 주변의 음향장을 보여 주고 있다.

10. 결론

지금 까지 상용 CFD 프로그램인 Fluent와 웬 소음 전용 해석 프로그램인 FanNoise를 통하여 상용 CFD 프로그램에 포함된 여러 유동 소음해석 기능과 산업체, 연구소에서 진행되고 있는 유동 소음사례를 설명하였다. 최근 상용 CFD 프로그램은 유동소음해석에 필요한 여러 기능을 포함하게 되어 사용자는 좀더 쉽게 유동소음 해석을 수행하는 것이 가능해졌다.

유동소음해석을 위하여 상용 CFD 프로그램 사용자는 자신의 목적에 맞게 상용 프로그램의 기능을 잘 선택해야 만 주어진 시간에 좋은 결과를 낼 수 있을 것이다. 

참고문헌

- (1) Hendriana, D., Sovani S.D. and Schiemann, M.K., SAE Paper No. 2003-01-1316.
- (2) An, C.-F., Alaie, S.M, Sovani S.D., Scislowicz, M. and Singh K., AE Paper No. 2004-01-0230.
- (3) Günter, Klingenberg and Joseph, M. Heimerl. 1992, "Gun Muzzle Blast and Flash." Volume 139, Progress in Astronautics and Aeronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics: Washington, D. C., pp. 134-148.
- (4) Souliez, F.J., Long L.N., Morris P.J. and Sharma, A., 2002, International Journal of Aeroacoustics 1, No. 2, pp. 115-135.
- (5) Li, F., Khorrami, M.R. and Malik, M.R., 2002, AIAA Paper 2002-2411, 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Beckenridge, CO.

- (6) Lockard, D.P., Khorrami, M.R. and Li, F., 2004, AIAA Paper 2004-2887, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, May 10-13.
- (7) Hold, R., Brenneis, A., Schwarz, V. and Siegert, R., 1999, "Numerical Simulation of Aeroacoustic Sound Generated by Generic Bodies Placed on a Plate: Part I - Prediction of aeroacoustic sources," AIAA Paper no. 99-1896, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Seattle WA, MAY 10-12.
- (8) Siegert, R., Schwarz, V. and Reichenberger, J., 1999, "Numerical Simulation of Aeroacoustic Sound Generated by Generic Bodies Placed on a Plate: Part II - Prediction of Radiated Sound Pressure," AiAA Paper no. 99-1895, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Seattle WA, pp. 10~12.
- (9) Neise, W., 1975, "Application of Similarity Laws to the Blade Passage Sound of Centrifugal Fans," Journal of Sound and Vibration, Vol. 43, No. 1, pp. 61~75.
- (10) 전완호, 이덕주, 1999, "수치기법을 이용한 원심팬 소음의 음향학적 상사법칙 적용," 한국소음진동공학회지, 제 9권, 제 5호, pp. 101~111.
- (11) Ffowcs-Williams, J.E., and Hawkings, D.L., Proceedings of the Royal Society of London A264, pp.321~342 (1969).
- (12) Lowson, M. V., 1965, "The Sound Field for Singularities in Motion," Proc. R. Soc. London, Ser. A. 286, pp. 559~572.
- (13) Proudman, I., 1952, "The Generation of Noise by Isotropic Turbulence", Proceedings of the Royal Society of London, Vol. A214, pp. 219.
- (14) Sakar, S. and Hussaini, M.Y., 1993, "Computation of Sound Generated by Isotropic Turbulence," NASA contract report no. 93-74, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 24681.

수송기계분과 세미나

◀ 엔진 및 파워트레인의 소음 진동 세미나 ▶

우리학회 수송기계분과의 세미나가 다음과 같이 계획되어 있습니다. 회원 여러분의 많은 관심과 참여를 기대합니다.

· 일시 : 2005년 6월 17일(금)

※ 자세한 내용은 추후 공지하겠습니다.

☞ 문의 : 사단법인 한국소음진동공학회 ksnve@ksnve.or.kr