

유동소음 해석 프로그램: CAA++

김영남*

1. 서론

유동소음 (aeroacoustics)은 유체의 운동으로부터 발생하는 다양한 소음의 발생 과정 및 전파과정을 연구하는 비교적 최근의 학문이다.

소음은 작은 에너지에 의해서도 발생되며, 먼 거리를 거의 에너지 손실 없이 전달되는 에너지의 형태로 기존의 CFD로는 해석에 어려움이 있다.

소음해석의 필수 조건은 높은 수치적 해상도를 확보하는 것, 시간과 공간상에서 wave 전파와는 다른 스케일을 갖고 있는 소음원을 정확하게 예측하는 것, 그리고 소음의 비반사 경계조건을 처리하는 것이라고 볼 수 있다.

지금까지의 유동소음 해석은 acoustic analogy (Light-hill, Curle, FWH)기법을 이용하는 방법, 그리고 비정상 압축성 유동을 직접 해석하는 방법으로 분류할 수 있다.

전자의 경우 편이성 때문에 현재 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 비정상 비압축성 유동해석을 수행하여 해석결과를 소음해석의 입력 값으로 사용한다. 그러나 acoustic analogy는 다음과 같은 문제를 갖고 있다.

- 1) 물체에 의한 반사, 회절 산란 등 소음의 전달 경로를 고려할 수 없다.
- 2) LES로 대표되는 비정상 점성유동은 많은 mesh와 해석 시간을 요구한다.
- 3) Acoustic resonance와 같이 소음과 유동이 강하게 상호작용하는 문제를 해결할 수 없다.
- 4) Acoustic source가 넓게 분포하는 경우 또는 고주파 대역에서 결과가 정확하지 않다.
- 5) 비압축성 해석의 경우 integral surface를 해석 공간에서 설정할 경우 유동해석 결과의 압력 값이 소음 방사조건을 만족시킬 수 없다.
- 6) 유동속도가 클 경우 ($Ma > 0.3$) acoustic source를 독립적인 소음원으로 처리 할 수 없다.

따라서 acoustic analogy는 차량과 같이 소음원이 넓게 분포하는 문제, internal flow와 같이 acoustic resonance 특성이 강한 유동소음 해석에 사용하는 것이 불가능하다.

후자와 같이 비정상 압축성 유동을 직접 해석하는 경우는 이러한 문제점을 극복할 수 있으나 CFD 프로그램에서 CAA (Computational AeroAcoustics)를 구현하는 데는 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

- 1) 현존하는 압축성 프로그램은 모든 조건에 적용할 수 있는 일반적인 형태의 비반사 경계조건을 제공하고 있지 않다.
- 2) 현재 CFD 프로그램으로는 수치오차와 소음을 구분할 수 없다.
- 3) 유동을 해석하는데 필요한 mesh로 소음해석을 수행하기 위해서는 많은 해석 시간을 요구한다.
- 4) 유속이 작은 경우 ($Ma < 0.3$) 소음원은 wave와 time scale에서 큰 차이가 나기 때문에 정확한 소음원을 얻기 위하여 정밀한 dual time step scheme 또는 dual mesh를 사용해야 소음원을 해석할 수 있다.

최근 computer의 급속한 발전으로 CAA 방법이 등장하였다.

이 방법에는 고해상도기법 (ENO, compact scheme)을 사용하고, 비반사 경계조건을 구비하고 있다. 이러한 CAA 접근 방법은 압축성 Navier-Stokes 방정식을 직접 푸는 방법과 선형화된 Euler 방정식을 사용하는 방법이 있다.

압축성유동을 직접 푸는 방법은 아직 많은 해석 시간 때문에 near field만을 대상으로 하고 있으며, 복잡한 3차원 형상의 비정렬격자에 고해상도 기법을 적용하기 어려운 점이 있어 주로 in-house code에서만 사용되고 있다. 또한 선형화된 Euler 방정식은 그 차체로는 소음원을 생성하지 못하기 때문에 소음원을 구성하고 있는

* 바람과소리(주), 대표
E-mail : ynkim@flow-noise.co.kr

압축성 점성유동 외부 영역의 소음전파 해석에 사용하고 있다. 이 경우 마찬가지로 많은 해석시간이 필요하다.

여기서 우리는 점성항을 포함하는 non-linear perturbation equation을 구성하여 flow variables와 acoustic variables를 분리하면서도 acoustic resonance와 같은 문제를 처리하기 위해 자체적으로도 large scale의 소음원을 만들어내며, 소음해석에 적절한 큰 mesh를 사용하여 해석시간을 단축하고, small scale의 난류 소음원을 모델링하여 일반적인 상황에 적용 가능한 소음해석 방법의 존재에 관심을 갖게 된다.

최근 MetaComputational Technologies사는 그들의 선도적인 기술을 이용하여 이러한 유동소음해석의 어려움을 현실적으로 극복한 CAA++를 선보이고 있다.

CAA++는 Navier Stokes 방정식으로부터 non-linear perturbation 방정식 (Non-linear Acoustics Solver)을 사용하여 기존의 선형화된 Euler 방정식의 한계를 극복하고 있으며 정상상태 난류 유동의 해석 결과로부터 synthetic turbulence model를 이용하여 broadband noise 문제를 해결하고 있다.

CAA++의 NLAS (Nonlinear Acoustics Solver) 접근 방법의 장점은 다음과 같다.

- 1) noise 해석에 적합한 large mesh를 사용하므로 비정상상태 소음해석시간을 줄일 수 있다.
- 2) broadband noise의 소음원을 얻기 위하여 정상상태 유동해석을 수행하므로 기존 비정상상태 해석 접근방법보다 획기적으로 해석시간을 단축시킨다.
- 3) 소음의 반사, 산란, 회절 등이 해석결과의 일부로 얻어진다.
- 4) Acoustic resonance와 같이 유동과 음향장의 강한 feedback effect를 포함하는 문제를 해석하는 것이 가능하다.
- 5) 유동의 inlet과 outlet 임의 영역에 비반사 경계조건을 포함시킬 수 있다.
- 6) 추가적으로 linear wave equation의 완전해를 사용하여 far field의 소음 값을 빠르게 얻어낼 수 있다.

그밖에 다른 유동소음해석 방법을 비교할 때 유사하지만 CAA++가 갖고 있는 추가적인 장점은 다음과 같이 나열할 수 있다.

- 1) 다른 해석 솔루션들이 난류정상상태 유동해석 결과로부터 소음원의 위치와 크기를 실험적 correlation에 의하여 보여주고 있으나 청취점에서의 noise full spectrum을 보여주지 못하는 반면

CAA++는 동일한 정상상태 유동해석 결과로부터 turbulence synthetic 방법을 이용하여 소음원의 위치 강도뿐 아니라 청취점에서의 full spectrum을 제공한다.

- 2) 다른 해석 솔루션들이 제공하고 있는 LES를 이용한 비정상상태 유동해석 결과를 FWH (Fowcs Williams Hawkings)에 적용하는 방법을 CAA++도 동일하게 제공할 수 있지만 CAA++는 근본적으로 압축성 유동해석이므로 소음의 방사조건을 만족하는 정밀한 결과를 제공한다.
- 3) 그 밖에 sliding average를 포함한 다양한 signal processing 기법을 포함하고 있다.

2. 본 론

2.1 유동소음해석 방법

MetaComputational Technologies사 가 제공하고 있는 솔루션을 이용하여 유동소음해석을 하는 방법은 크게 3단계로 분류할 수 있다.

1) CFD++를 이용한 비정상상태 유동해석

이 방법은 low mach number, high mach number에 모두 적용가능하며 (기존 유동해석프로그램은 비압축성 유동에만 적용 가능) 외부유동, 내부유동에 일반성을 갖고 접근할 수 있다. Full compressible Navier-Stokes 방정식을 비반사조건과 함께 직접 풀며 laminar, LES 또는 Hybrid RANS/LES 모델을 사용하게된다.

Discrete tonal, broadband noise 뿐 아니라 acoustic resonance까지 해석하는 것이 가능하며, FWH를 이용하여 far field의 청취점에서의 소음을 계산하게 된다.

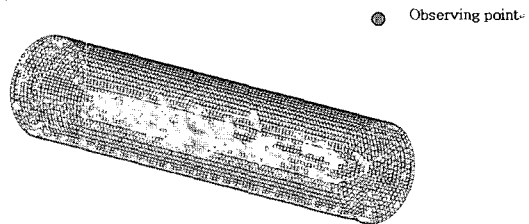


Fig. 1 far field noise해석을 위한 integral surface

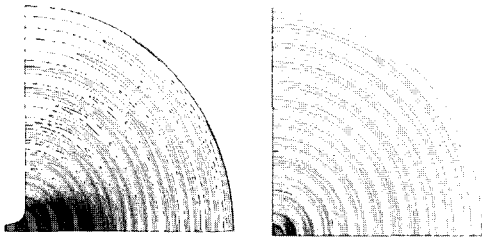


Fig. 2 Ultra sonic problem (40 kHz)

이는 기존의 유동해석 프로그램과 유사한 기능으로 보이지만 압축성 효과와 비반사경계조건을 포함하고 있어, 소음 반사, 산란 효과가 포함되며 해석 영역에 설정된 integral surface 상에 Sommerfeld의 방사조건을 완전히 만족하는 acoustic pressure를 얻을 수 있다. 반면 기존의 비압축성 유동을 사용하고 해석 공간에 integral surface를 사용할 경우 방사조건을 만족시킬 수 없다.

이 방법은 LES를 사용하므로 많은 mesh를 요구하기 때문에 다음에 소개할 NLAS에 비하여 해석 시간이 많이 필요하다는 것과 broadband noise에서 고주파 특성이 다소 부정확해지는 특성이 있다.

2) CFD++를 이용한 정상상태 유동해석

이 방법은 CFD++를 이용하여 정상상태 RANS 해석 결과를 얻는다. 그리고 유동해석의 정상상태 난류해석 결과를 이용하여 청취점의 noise full spectrum을 해석한다.

기존 유동해석 프로그램에서는 여러 연구자의 난류 소음의 모델을 적용하여 소음원의 위치, 강도의 비교 결과를 제공하고 있으나 그 결과는 정성적인 값으로 실질적인 소음 정보를 제공하는 것은 아니며 또한 소음원의 결과로 청취점에서의 소음정보를 알 수 없다.

반면 turbulence synthetic model을 사용할 경우 소음원의 위치, 강도 그리고 청취점에서의 정량적인 acoustic pressure의 time signal과 noise full spectrum을 구할 수 있다.

이러한 접근 방법은 turbulence noise만을 포함하고 있기 때문에 유동소음 해석 초기 단계의 소음 평가를 위해서 사용할 수 있다.

3) CAA++의 NLAS를 이용한 유동소음 해석

이 방법은 가장 진보된 형태의 유동소음 해석으로 1)에서 문제되었던 해석시간을 단축하고, acoustic variable

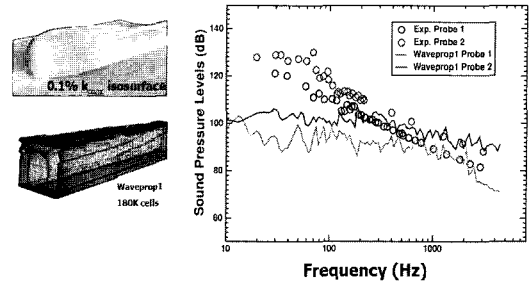


Fig. 3 broad band signal

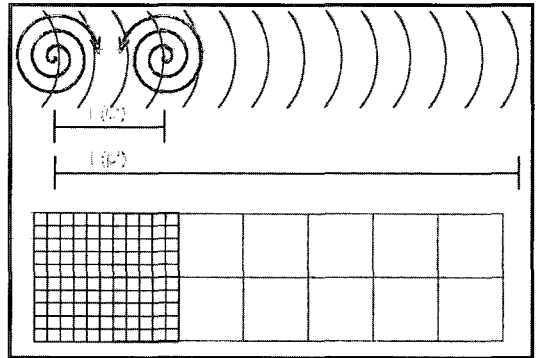


Fig. 4 점성유동과 acoustic 해석에 필요한 mesh 비교

들의 해상도를 높여주며, turbulence noise를 정확하게 해석할 수 있는 방법으로 볼 수 있다.

해석 절차는 2)에서와 같이 CFD++의 정상상태 RANS 해석결과를 구하고 이를 CAA++의 입력 값으로 사용하게 된다. 사용하는 mesh는 2)에서 사용한 mesh 보다 noise 해석에 적합한 large mesh를 사용하는 것이 가능하다.

NLAS는 그 동안 유동소음해석의 문제점으로 대두되었던 여러 문제들을 현실적으로 해결할 수 있는 가장 진보된 CAA 해석 프로그램으로 볼 수 있다.

2.2 Synthetic turbulence

CAA++의 synthetic turbulence는 정상상태 난류유동 해석에서 난류의 통계적 대표 값을 이용하여 시간, 공간 상에 난류를 재구성하는 방법이다. Hybrid LES/RANS 모델의 경우 mesh 내부의 small scale turbulence를 모델링하는 방법의 사용하고 있기 때문에 LES를 적용하기 위한 mesh size는 Kolmogorov Scale 정도를 요구한다. 따라서 LES 계열들의 난류모델을 사용해 비정상상태 난류유동을 해석하기 위해서는 너무나 많은 해석 시

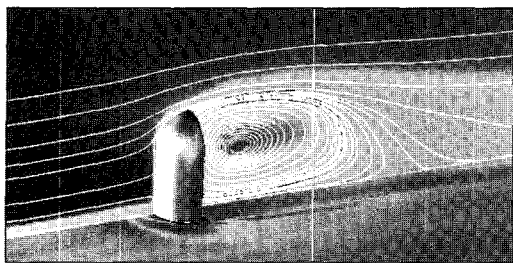


Fig. 5 Side mirror의 acoustic source의 분포



$$u'_i(x_j, t) = a_k \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N [p_k^n \cos(d_j^n \hat{x}_j + \omega^n t) + q_k^n \sin(d_j^n \hat{x}_j + \omega^n t)]$$

Fig. 6 Synthetic turbulence: 난류의 통계치로부터 비정상상태의 난류를 재구성

간을 소요하기 때문에 이보다 좀더 현실적인 대안이 필요하다. Synthetic turbulence는 정상상태 유동해석의 결과를 사용하기 때문에 해석시간을 대폭 감소시킬 뿐 아니라 해석결과의 mesh에 대한 의존도를 없앨 수 있는 방법이다. 국내 LES 모델의 적용이 많은 부분 유동소음 해석에 집중되고 있는 점을 생각할 때 synthetic turbulence 방법은 현재로서 가장 효율적으로 LES를 대체할 수 있는 형태로 볼 수 있다.

2.3 Non-Linear Acoustic Solver

NLAS (Non-Linear Acoustic Solver)의 기본적인 아이디어는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) Compressible Navier-Stokes 방정식을 직접 풀 때의 수치오차를 극복하기 위하여 flow variables 와 acoustic variables를 분리하여 해석
- 2) 복잡한 형상을 구현하는 데 필요한 비정렬격자에 적용 가능한 방법을 제공
- 3) LEE (Linear Euler equation)의 한계를 극복하기 위하여 full Navier-Stokes 방정식으로부터 non-linear acoustic variables에 의한 방정식을 구성.

- 4) Small scale의 turbulence noise는 수치모델로, large scale noise는 직접 해석
- 5) Small scale의 turbulence noise는 정상상태 난류 유동 해석결과를 사용
- 6) LES나 RANS의 mesh보다 균일한 형태의 큰 mesh를 사용하여 해석시간을 단축
- 7) 자동화된 비반사조건 (absorbing layers)을 사용하여 wave의 방사조건을 완벽하게 구현
- 8) CAA는 소음원 주변의 유동만을 처리하고 청취점에서의 far field 특성은 linear wave equation의 exact solution을 사용하여 빠르고 정확하게 해석
- 9) 다양한 signal processing 기능을 제공하여 소음 관련 실무자에게 익숙한 용어로 결과를 제공

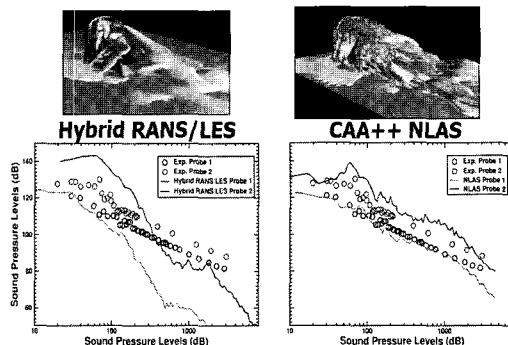


Fig. 7 Hybrid RANS/LES는 high frequency에서 NLAS에 비고하여 부정확함을 볼 수 있다.

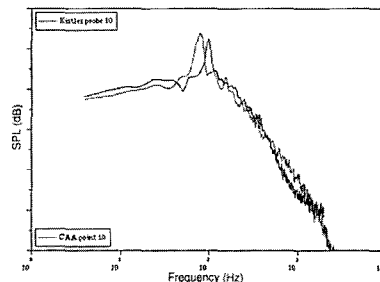
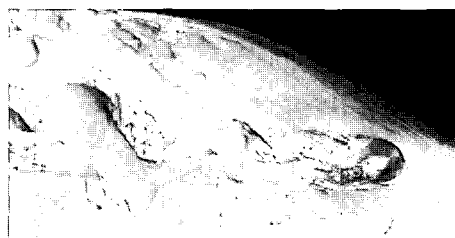


Fig. 8 side mirror noise

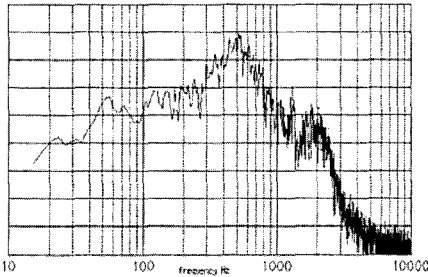


Fig. 9 car boot-door cavity noise

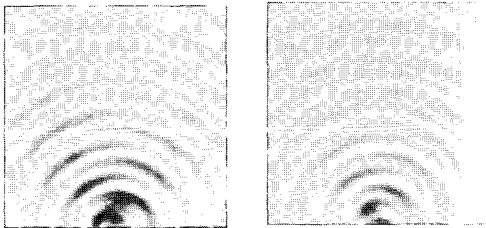


Fig. 10 오른쪽 self-tuned absorbing layer



Fig. 11 high lift device noise generation

또한 소음은 유동으로부터 수동적으로 발생하는 것이 아니라, 유동의 특성 즉 소음원의 특성을 변경시키기 때문에 유동과 소음을 분리하여 취급하는 것이 불가능한 경우가 대부분이다.

지금까지 개발된 유동소음 해석 방법은 아직 일반성을 갖고 모든 유동소음 문제에 적용하기 어려운 문제를 갖고 있으며 앞으로도 유동소음해석 영역은 많은 연구가 필요한 부분이라고 볼 수 있다.

CAA++의 경우 이러한 한계를 많은 부분은 해소한 현재로서의 가장 현실적인 대안이라고 볼 수 있다.

참고문헌

- (1) Batten, P., Ribaldone, E., Casella, M. and Chakravarthy, S.R., "Towards a Generalized Non Linear Acoustics Solver," AIAA 2004 3001, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, 10~12 May, 2004.
- (2) Batten, P., Goldberg, U.C. and Chakravarthy, S.R., "Interfacing Statistical Turbulence Closures with Large Eddy Simulation," AIAA Journal, 42, 3, March, 2004.
- (3) Batten, P. Goldberg, U.C. and Chakravarthy, S.R., "Reconstructed Sub Grid Methods for Acoustics Predictions at all Reynolds Numbers," AIAA 2002 2511, 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Breckenridge, CO, 17 19 June, 2002.
- (4) Batten, P. Goldberg, U.C. and Chakravarthy, S.R., "Sub Grid Turbulence Modeling for Unsteady Flow with Acoustic Resonance," AIAA 00 0473, 38th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, 2000.

3. 결론

유동소음 해석은 acoustic pressure의 크기가 매우 작고, 주파수 관점에서는 가청주파수 영역인 20Hz~20kHz의 넓은 영역을 해석하는 매우 어려운 연구 분야이다.