

특집

소음진동 해석 소프트웨어

방사 소음 해석 기법 소개

이상엽*, 이승영
(엘엘에스코리아㈜)

1. 머리말

이 글에서 소개하는 방사 소음은 음원(구조물 진동 또는 해석 모델 경계 면의 압력 변동)으로부터 공기(수) 중으로 전파되는 소음 해석을 일컫으며, 방사 소음의 해석 및 소음 대책을 위해 필요한 작업은 음원(해석 모델 경계 면에서의 속도, 압력, 임피던스+속도 및 summerfield radiation 조건) 규명과 방사 소음 해석 및 기여도 해석 등이며 음원 규명과 방사 소음 해석 되는 최신 기법에 대한 소개를 한다.

음원(경계 조건) 규명에 사용 되는 기법으로는 INA(inverse numerical acoustics), modal expansion, point load identification, impedance 경계 조건 + volume velocity 규명 기법, random acoustic loading, aero acoustic loading, 1D/3D시물레이션에 의한 음원 모델 등 다양한 기법들이 있으나 이 글에서는 최근에 Virtual.lab Acoustic에 출시된 INA 기법에 대한 소개로 제한 하겠으며, 방사 소음 해석 기법으로는 저/중 주파수 대역에서 많이 사용되고 있는 FEM(기존 FEM, IFEM, PML, AML) 및 BEM(기존 BEM, FMBEM) 중 특히 최신 방사 소음 예측에 사용되는 기법인 AML 기법에 대한 소개를 중점적으로 하고자 한다. 특히 AML 기법은 2011년도부터 상품화된 최신 기법이다.

2. 음원 규명 기법

INA는 속도를 측정하기 어려운 음원의 표면에서 속도를 계산하기 위하여 그림 1과 같이 음원 주위에서의 음압을 측정하고 음향 전달 벡터를 이용하여 음원 표면에서의 등가 속도를 계산한 후, 계산된 등가 속도를 방사 소음의 예측 시 음원으로 사용 방법이다.

INA를 사용하여 음원 표면에서의 수직 방향 속도를 계산하기 위해서는

(1) 음원 주위의 음압 측정

측정시 주의 사항으로는 아래와 같다.

- 음압 측정면과 음원 사이의 거리가 최대 분석 주파수 파장의 1/3 이하 : 근접장에서 존재하는 에버네센트(evanescent)파 가 측정 되므로 음원 표면 속도를 계산 값이 실제 표면

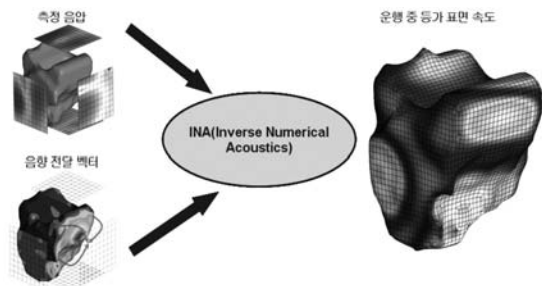


그림 1 INA 해석 과정

* E-mail : sangyeop.lee@lmsintl.com / (02) 571-7246

속도와 유사하게 개선됨.

- 음압 측정면과 마이크론 사이의 간격
: 최대 분석 주파수 파장의 1/2 이하

(2) 음원 경계 요소와 음압 측정면 사이의 음향 전달 벡터의 계산

음향 전달 벡터는 경계요소법(boundary element method; BEM), 또는 유한요소법(finite element method; FEM)으로부터 계산되며, BEM, FEM 모델 작성시 주의 사항으로는 가능한 표면 요소 크기가 같도록 요소를 생성하면 음향 전달 벡터의 역행렬 계산시 수치해석 에러를 줄일 수 있다.

(3) 음향 전달 벡터(ATV)의 역행렬 계산 후, 측정된 음압(p)과 곱하면 음원 경계 요소 절점에서의 표면 속도(v)가 계산되며, 계산식은 식 (1)과 같다.

$$\{v\}_{N,1} = [ATV]_{N,NF}^{-1} \cdot \{p_F\}_{NF,1} \quad (1)$$

일반적으로 음압 측정 지점의 수는 음원 모델의 절점의 수에 비해 작으므로 역행렬 계산은 underdetermined 문제이며, 이를 해결하기 위한 방법으로는 SVD(singular value decomposition)이 사용되며, SVD시에 수치해석 에러를 줄이기 위

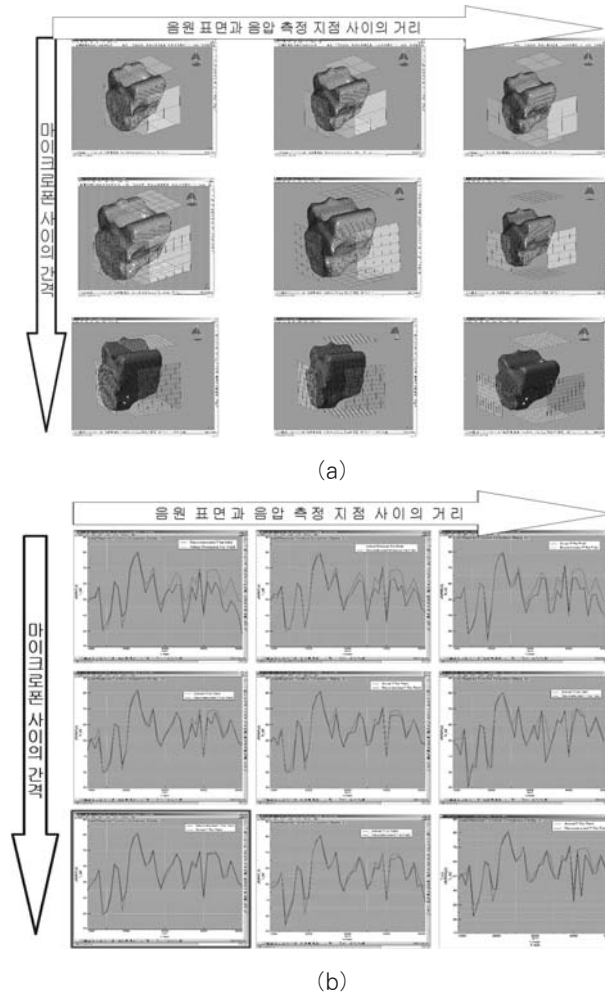


그림 2 (a) INA 측정 위치 및 마이크론 간격, (b) 원거리 음장에서 예측 결과와 실제 음압 비교

해 L 커브방식이 사용된다. L 커브방식은 ATV의 역 행렬 계산시, 예측된 표면속도(V)를 사용하여 측정된 지점에서의 다시 예측된 소음과 원래 사용된 측정 소음 사이의 에러 ($\| [ATV] \cdot \{v_{n,synthesized}\} - P_{F,measured} \|_2$)는 최소화 하고, 예측된 표면 속도($\| \{v_{n,synthesized}\} \|_2$)는 극대화하는 지점인 L 커브의 꺾인 지점 즉, 절충지점에 해당되는 지점에서의 singular value 개수를 정한 후, 표면 속도를 예측하는 방식이다.

그림 2(a)의 종 방향은 음압 측정 면과 음원 사이의 거리가 우측으로 갈수록 멀어지며, 횡 방향은 음압 측정 면에서의 마이크로폰 사이의 간격이 아래로 갈수록 좁아지고 있다. 음압 측정 면과 음원 사이의 거리 및 마이크로폰 사이의 간격이 원거리 음장의 예측시 미치는 영향을 살펴 보기 위해 사용된 음원과 측정지점을 보여주고 있다.

그림 2(b)는 그림 2(a)에 해당하는 원거리 음장에서 음압 예측 결과를 보여주고 있다. 첫 번째 행을 살펴 보면 원거리 음장에서 음압 예측 결과는 마이크로폰 사이의 간격을 줄임으로써 고주파 영역에서의 해석 결과가 실제 음압과 유사함을 살펴 볼 수 있으며, 세 번째 열을 살펴 보면 음압 예측 결과는 측정지점과 음원 사이의 거리에 커다란 영향을 받지 않음을 살펴 볼 수 있다. 그러나 음원에서의 예측된 표면 속도는 측정지점과 음원 사이의 거리에 멀어질수록 에러가 증폭되므로 가능한 범위에서 거리를 근접시켜 주는 것이 좋다.

음압 사이의 MAC 값 계산식 식 (2)와 같으며, P_1 은 예측된 음압 이며, P_2 는 실제 음압이다.

$$MAC_{P_1, P_2} = \frac{([P_1]^* \cdot [P_2])^2}{([P_1]^* \cdot [P_1]) \cdot ([P_2]^* \cdot [P_2])} \quad (2)$$

INA 기법은 예측된 등가 표면 속도는 실제 물체의 표면 속도와 차이는 발생하나, 원거리 음장에서 방사 소음의 예측결과는 매우 정확하게 나타난다.

3. 방사 소음 해석 기법

3.1 Automatically Matched Layer

방사 소음 해석 기법으로는 크게 FEM과 BEM으로 대별되며, FEM의 경우 BEM에 비하여 계산 시간이 매우 빠르다는 장점에도 불구하고, 모델링의 편리성(BEM의 경우 음원 주위 공기에 대한 모델 작업은 필요하지 않고 음원 경계 면에서의 모델만 작성하면 된다. 예를 들어 엔진 방사 소음을 모델링 하기 위해서는 엔진 경계면 형상 모델 및 무한 공간에서의 sommerfeld 방사 조건 구현)으로 인하여 주로 BEM 기법이 사용되어 왔으며, BEM의 경우 음장의 정확한 솔루션인 그린 함수를 사용함으로 인하여, 음원 주위 공기 공간의 모델링시 절점에서의 유도된 근사화된 속도 및 인텐시티를 변수로 사용되는 FEM에 비하여 계산 결과가 정확하다. 기존 FEM의 경우, 엔진 경계면 형상 모델 + sommerfeld 방사 조건을 만족시킨다는 영역(원거리 음장)까지의 엔진 주변 공기의 유한 요소 모델이 필요하며, 또한, 무한 공간에서의 sommerfeld 방사 조건 구현하기 위해서는, 모델의 외부 표면에 평면파동이라는 가정을 하에 $\rho \cdot c$ 경계 조건 부여하거나 또는 주변 공기 모델의 외부 표면을 원 또는 타원 형상(타원, 원 형상의 반지름 최소 크기 $R > \lambda \max, 2 * \lambda \max$)으로 만든 후 IFEM 요소로 경계 조건을 부여 함으로써 방사 소음의 해석을 수행하였으나, 모델의 크기가 매우 커져 계산 시간이 많이 소요 되므로 인해 매우 저 주파수 해석만 가능하다.

FEM 기법의 단점을 극복하기 위해 수년간 노력의 결과로 PML 기법을 2009년에 출시하였다. PML 기법은 음원 주변 공기 모델의 외부 표면을 음원 주변으로 근접 시켜 FEM 모델의 크기를 대폭 축소 시켰으며, 또한 FEM 모델 외부 표면에는 PML 레이어를 만들어 non-reflecting 방사 조건을 만족시키는 방법을 사용하여 방사 소음 해석 시간을 BEM 기법에 비해 수십 배 이상 단축시켰다. 2010년 하반기에 이를 더욱 개량시킨 AML

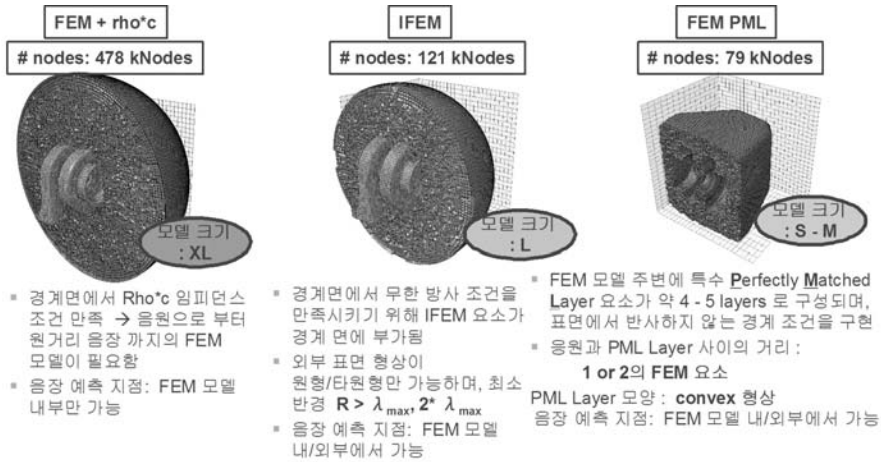


그림 3 FEM/IFEM 및 PML 기법에서 사용되는 모델의 크기 비교

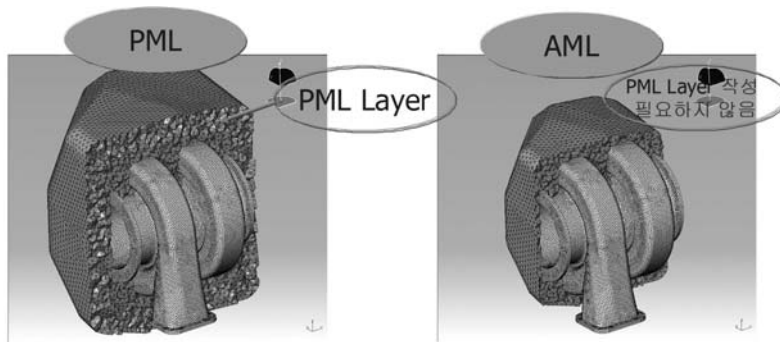


그림 4 PML과 AML의 모델링 방식의 차이

기법을 출시하였다. 이 기법은 PML 레이어를 사용자가 모델시 작성하지 않고 소프트웨어에서 솔빙시 자동으로 고려함으로써 PML 레이어 작성의 번거로움을 해소시켰으며, 또한 솔빙시 주파수 영역에 따른 레이어 두께를 자동으로 변경하여, 계산 소요 시간의 단축 효과를 구현하였다.

그림 3, 4에 PML과 AML 기법에 사용되는 모델 크기 및 계산 방법의 차이를 나타내었다.

표 1은 BEM/PML/AML 기법을 사용하여 실제 6기통 엔진 모델의 방사 소음 해석에 걸리는 시간을 비교한 값이며, AML 해석(direct MUMPS 솔버 사용)이 BEM에 비해 약 20배 이상의 계산 시간 개선 효과가 있음을 살펴 볼 수 있다.

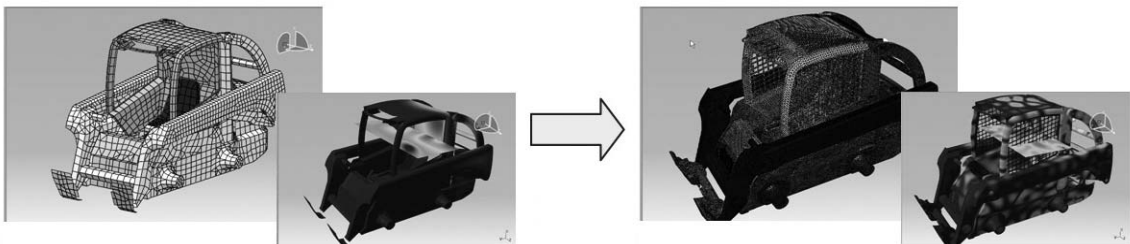
3.2 음향 경계요소법(acoustic boundary element method)

경계요소법은 복잡한 3D 문제를 2D 표면 차원의 문제로 효과적으로 줄여 음향모델의 형상과 경계조건(표면음압, 진동속도, 음향 임피던스)으로부터 임의의 관심있는 위치에서 음향특성(음압, 음향파워, 입자속도, 음향강도)을 예측하는 수치해석적인 방법이며, 흡배기계(intake & exhaust system)의 소음저감특성, 기계구조물의 방사소음, 차량실내소음 등의 대부분의 음향문제에 쉽게 사용할 수 있는 음향예측 방법이다.

진동하는 구조물의 표면만이 음향모델로 생성되므로 경계요소 모델의 크기는 전형적으로 수

표 1 BEM, PML, AML 계산 시간 비교표

Computing method	Direct		Iterative				Direct mumps
	Indirect BEM ATV 20~3000 Hz	FEM PML ATV 1 20~500 Hz	FEM PML ATV 2 500~3000 Hz	FEM AML ATV 1 20~500 Hz	FEM AML ATV 2 500~3000 Hz	FEM AML ATV 2 2~3000 Hz	
# nodes	4,893	47,155	181,676	12,947	116,120	116,120	
# elements	4,894	263,661	1,035,257	66,849	649,857	649,857	
# field points	22	22	22	22	22	22	
Single RPM acoustic response							
# processors	8	8	8	8	8	1,4 threads	
Time(min)	237	1.3	17	0.3	12	89	
RAM at start(Gb)	6.8	3.4	7	1	2.6	2.8	
RAM steady state(Gb)	6.8	1.7	3.6	1	2.6	2.8	
# freqs	150	25	126	25	126	150	
Equivalent 1 processor time/freq	12.64	0.42	1.08	0.096	0.76	0.59	
ATV computation							
# processors	8	8	8	8	8	1,4 threads	
Time(min)	243	7.5	333	4	222	125	
RAM at start(Gb)	6.8	3.4	6.6	1	2.6	2.8	
RAM steady state(Gb)	6.8	1.7	3.2	1	2.6	2.8	
# freqs	150	25	126	25	126	150	
Equivalent 1 processor time/freq	12.96	2.4	21.14	1.28	14.10	0.83	
Full RPM modal ATV response 41 RPMs							
Time(min)	1	0.2	1	0.2	1	1	
Delta RAM(Gb)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	
# freqs	12259	2009	10291	2009	10291	12259	
time/freq	Very small	Very small	Very small	Very small	Very small	Very small	



일반 경계요소법(8,600개 절점과 9,000개)

다극 경계요소법(86,000개 절점과 171,000개)

그림 5 일반 경계요소법과 다극 경계요소법의 비교

천 개의 요소로 제한되며, 복잡한 3D유한 요소 모델에 비해서 상대적으로 모델 크기가 작아서 검증, 조작, 생성이 쉽다. 이 감소된 모델은 보다 짧은 시간 내에 결과를 도출하고 사용자가 음향 설계성능을 빨리 평가하도록 도와 준다.

3.3 다극 경계요소법

일반적인 경계요소법은 음향문제를 계산할 수 있는 매우 효과적인 방법이다. 하지만 결과적으로 계산해야 하는 매트릭스의 형태가 비대칭적이기 때문에 해석모델이 커지거나 계산하고자 하는 주파수 영역이 높아질수록 컴퓨터의 메모리를 많이 사용하고, 계산시간도 많이 소요되는 단점이 있다.

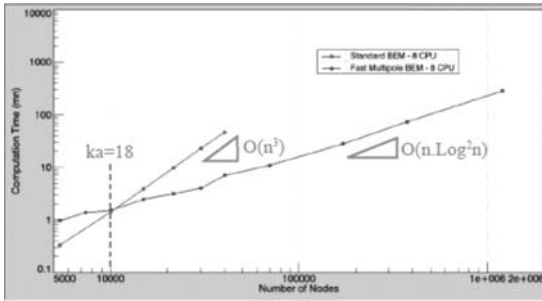


그림 6 고전적인 경계요소법과 다극 경계요소법의 계산 시간 비교

다극 경계요소법(FMBEM; fast multipole boundary element method)은 이제껏 사용되어 왔던 이러한 BEM기술의 단점을 보완하여 매우 큰 BEM문제를 계산하는 효율적인 경계요소 계산 방법이다. 즉 고전적인 경계요소법은 50,000개까지의 절점을 가진 모델을 계산할 수 있었지만 FEBEM은 1,000,000개 이상의 절점을 가지는 음향모델을 효과적으로 계산할 수 있다. 이 새로운 계산기술은 경계요소법의 범위를 확장하여 더 높은 주파수 영역의 큰 음향문제들을 다룰 수 있게 한다.

요소 개수가 10,000개 이하의 저주파 영역에서는 고전적인 경계요소법이 FMBEM보다 더욱 효율적이지만 요소의 개수가 많아질수록 FMBEM의 계산속도가 기존 경계요소법에 비해 훨씬 빠른 것을 그림 6을 통해 알 수 있다. 이는 일반적인 경계요소법이 음향문제를 계산하기 위해서 $O(n^3)$ 연산을 요구하는 반면에 FMBEM은 단지 $O(n.Log^2 n)$ 연산만을 필요로 하기 때문이다. 가령 40,000개의 경계요소로 구성된 음향모델의 음향 특성을 계산하는 경우 FMBEM은 기존 경계요소법보다 약 7배정도 더 빠르다.

Virtual.Lab Acoustics FMBEM 모듈은 다극 확장 과 다단계 계층조직 부분합성에 기초한 알고리즘을 가지고 BEM방정식을 계산할 수 있는 고속 반복 기술(high-speed iterative technique)을 사용합니다. 이 방법은 한번에 음향모델을 계산하는 대신에, 자동으로 음향모델을 여러 영역으로 분할

하고 차례대로 반복해서 세분화한 후 각각의 세분화된 영역을 고전적인 BEM 모델로써 계산한다. 전환 연산자는 그 영역들 사이의 관계를 묘사하고, 빠른 반복 알고리즘을 사용하여 전체 모델을 결합하여 계산한다. 전체 계산시간은 BEM 모델의 절점의 개수에 거의 선형이고 메모리가 작게 사용되며 PC, multi-CPU 시스템, 리눅스 클러스터(LINUX cluster)에서 실행할 수 있다.

4. 맺음말

이 글에서는 음원 규명과, 방사 소음 해석에 사용되는 최신 기법을 소개 하였으며, 방사 소음의 예측시 정확한 해석 경계 조건(음원 규명)의 부여 및 적절한 방사 소음 해석 기법의 선택은 해석 결과의 신뢰성 획득과 계산 시간의 단축을 위한 필수적인 사항이다.

정확한 해석 경계 조건의 산출을 위한 방법으로 실제 근접 음장에서 측정된 음압을 입력으로 음원에서의 표면 등가속도를 산출해 내는 INA 기법을 소개 하였으며, 원거리에서의 방사 소음 예측 결과와 실제 음압을 비교 제시함으로써 INA 기법에 의한 음원 모델링의 신뢰성을 살펴 보았다.

일반적으로 공기중의 음장 해석 기법 자체는 매우 정확한 값을 산출하나, 모델의 크기로 인한 계산 시간의 소요로 인하여 방사 소음 해석이 저주파 영역에서만 수행되어 왔다. 이 글에서는 방사 소음의 예측에 사용되는 FEM, BEM 기법의 간략한 소개와 특히 계산 시간의 단축을 위해 사용된 AML 기법을 소개 하였으며, 이 기법은 PML 레이어를 사용자가 매쉬 모델링시 작성하지 않고 소프트웨어에서 솔빙시 자동으로 고려함으로써 PML 레이어 작성의 번거로움을 해소시켰으며, 또한 솔빙시 주파수 영역에 따른 레이어 두께를 자동으로 변경, 주파수에 따른 매쉬 크기를 최적화함으로써 계산 소요 시간의 단축 효과를 구현하였고, 엔진 모델의 방사 소음 해석에서 표 1과 같이 기존 기법에 비해 약 20배 이상의 계산 시간의 단축을 가져왔다. KSNVE