

TIME DOMAIN BEM 개발 및 적용

Development and applications of Time Domain BEM

김영남†
Young Nam Kim

1. 서론

기존 시간영역에서의 소음해석과 유동소음해석은 주로 Finite Element Method, Finite Volume Method를 사용하여 왔다. 이러한 방법은 넓은 공간을 대상으로 하는 소음해석의 특성 상 많은 공간 mesh를 요구되며, Helmholtz 방정식을 사용하는 주파수 영역의 BEM(Boundary Element Method)은 해석영역의 경계 mesh 만을 사용하지만 matrix 저장공간과 matrix 해석에 많은 시간이 소요되어 해석 시간을 크게 줄여주지 못하며, 지금까지 수천 개 정도의 경계 mesh에 만 적용되어 왔다. 이러한 문제를 극복하기 위한 대안이 Time Domain BEM 이라고 볼 수 있다. Time Domain BEM의 장점과 단점은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 시간에 대한 음원 data를 직접 사용.
- matrix를 풀지 않기 때문에 해석 시간이 빠름.
- CFD, CAA와 쉽게 연결되어 소음해석 가능
- 시간에 따라 경계면의 압력 값을 저장해야 함.

2. 본론

2.1 Time Domain BEM의 수치기법 및 검증

wave 방정식의 해는 Time Domain BEM 형태로 압력의 경계 값은 다음과 같이 경계적분으로 표현될 수 있다.

$$2\pi p + \int \left(\frac{1}{r^2} [p] + \frac{1}{cr} [\dot{p}] \right) \frac{\partial r}{\partial n} dS = \int \frac{1}{r} \left[\frac{\partial p}{\partial n} \right] dS \quad (1)$$

여기서 c 는 음속을 나타내며, $[]$ 는 retarded time으로 음원의 거리만큼 지연됨을 표현하고 있다. 위 방정식은 항상 현재의 압력 값이 과거 값에 의하여 결정되는 형태로, $c\Delta t \geq \Delta r$ 의 조건에서 압력은 matrix를 풀지 않고 해를 얻을 수 있다. 하지만 일반적으로 형상 표면의 mesh는 크기가 일

정하지 않기 때문에 $c\Delta t < \Delta r$ 에 속하는 경계 mesh를 포함하는 경우 압력은 주변 값에 의하여 implicit하게 결정되어야 한다. 본 연구에서 경계적분은 경계 mesh에서 모두 하나의 압력 값을 갖은 것으로 했으며, 이는 mesh의 연결정보가 필요 없어 data 구성이 용이하다. 경계 mesh의 최대 크기는 최대 해석 주파수 f_{max} 의 wave length의 1/20 크기 보다 작게, time step Δt 또한 $\frac{1}{20f_{max}}$ 를 사용했다. 이 보다 큰 값을 사용할 경우 정확한 정현파 형상을 만들 수 없음을 수치적 실험을 통하여 알 수 있다. 또한 입력 값이 다양한 주파수 성분을 구성되어 있을 경우 f_{max} 보다 큰 고주파 값은 수식 (1)의 3번째 항의 미분 값에 의하여 수치적 안정성을 잃게 된다. 외부 입력 값을 사용하는 경우 음향해석 이전에 f_{max} 보다 큰 고주파 입력 값은 Low Pass filter를 사용하여 제거했다. 그림 1은 time domain BEM의 수치적 구성을 보여주는 그림이다. 본 연구의 검증을 위하여 heaving sphere와 oscillating sphere 그리고 loud speaker 문제에 적용하였으며 그림 2, 3, 4에서 해석 해와 잘 일치함을 알 수 있다.

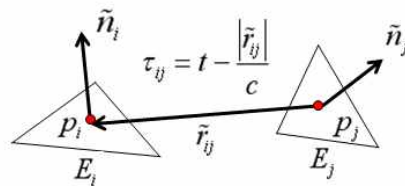


그림 1. Time domain BEM의 수치적 구성

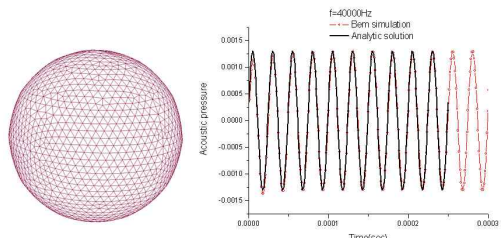


그림 2. 구의 표면 mesh 및 Heaving sphere 해석결과

† 김영남; 바람과소리㈜

E-mail : ynkim@flow-noise.co.kr

Tel : (02) 2093-2972, Fax : (02) 2093-2976

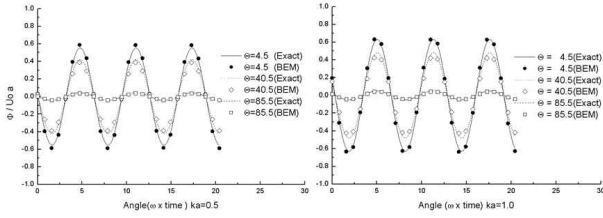


그림 3. Oscillating Sphere 해석 결과

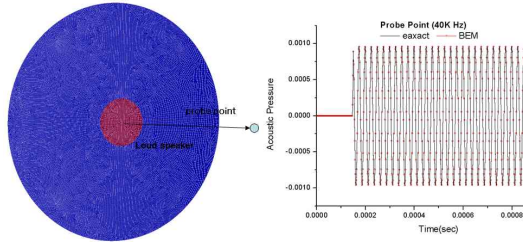


그림 4. Loud speaker 해석 결과

2.2 Time Domain BEM의 적용

본 연구에서 개발된 time domain BEM을 robot 청소기의 송수신부 및 청소기 형상 설계문제에 적용하였다. Robot 청소기기는 40,000 Hz의 고주파 음파를 송신부에서 일정 간격으로 10주기 정도 발생시켜 물체에 반사되어 돌아오는 시간을 감지하여 거리를 계산하며, 송신부의 진동판이 정현파가 아니기 때문에 주파수 영역에서 해석이 불가능한 문제라고 볼 수 있다. 이 때 바닥으로부터 음향 산란을 최소화하고 청소기 진행 방향 좌우로 측정 범위를 넓혀주는 송신부 horn 형상 설계와 청소기 형상을 결정하는 것이 robot 청소기의 매우 중요한 설계 요소이다. 그림 5.는 horn의 형상에 따른 acoustic directivity를 해석한 결과이다. 그림에서 보여주는 것처럼 horn의 형상을 위 아래로 긴 타원으로 만들 때 전체 음향 강도는 떨어지지 만, 상하보다 좌우로 음파가 잘 전달되며 바닥면의 음향 산란을 줄여줄 수 있음을 알 수 있다.

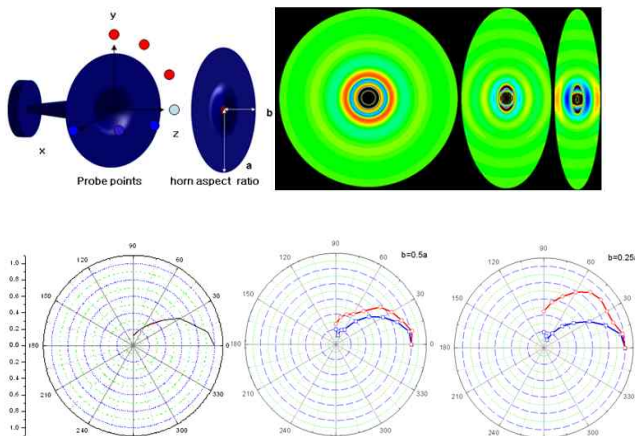


그림 5. Horn의 형상에 따른 음향 방향성
(위 왼쪽: horn의 형상 및 probe 위치, 위 오른쪽:

acoustic directivity contour, 아래: probe 위치에서 acoustic pressure magnitude)

그림 6.은 robot 청소기 전체 형상에 대한 소음해석으로 전체 mesh는 대략 400,000 mesh, 6 CPU를 사용하였으며 해석시간은 140hr 소요되었다. 그림에서 보여주는 것처럼 기존 청소기에 비하여 타원형 송신부를 사용하고, 청소기 하단부 모서리의 곡률을 좀더 크게 한 아래 청소기 형상 설계 안이 음향산란이 작게 나타나고, 좌우 음향 방향성이 커서 수신부의 물체 감지 성능을 높여주는 것을 알 수 있다. 그림 7.은 각진 물체에 대한 음향산란 해석 결과를 보여주고 있다. 고주파의 특성 때문에 이 경우 수신부에 전달되는 음향 반사파가 매우 약하여 물체의 존재를 인식하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

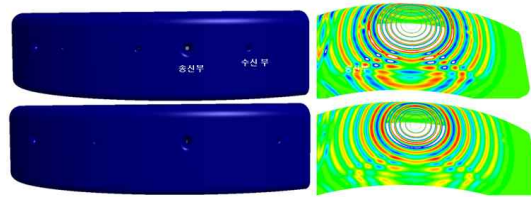


그림 6. Robot 청소기 형상에 대한 음향해석 결과
(위: 기존 청소기 형상, 아래: 수정된 청소기와 송수신부 설계안)

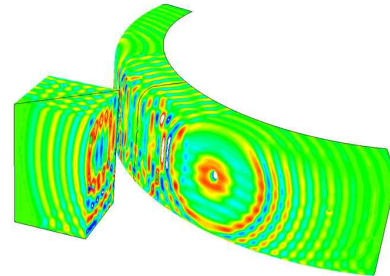


그림 7. 각진 물체에 의한 음향산란 해석 결과

3. 결 론

Time domain BEM은 아직 연구 시작 단계이지만 기존의 주파수 영역 BEM, 또는 다른 수치 기법에 비하여 시간 data를 직접 활용, 해석 시간 단축, CFD, CAA와 연결성 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 앞으로 수치적 안정성과 효율적인 data 처리, 원거리 소음원들의 clustering을 통한 계산시간 단축에 대한 연구가 이루어질 경우 좀더 실제 소음 및 음향 해석에 도움을 줄 것으로 기대된다.

후 기

본 연구의 time domain BEM 적용 부분은 LG 전자와의 프로젝트 결과 임.