

역경계요소법에 기초한 음향홀로그래피에서 강체산란체를 이용한 음장 측정 개수 증가

*김성일, **정지훈, *이정권

*한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어연구센터, **현대자동차㈜

Augmentation of Field Measurements Using a Rigid Scatterer in the BEM-based NAH

Sung-Il Kim, Ji-Hoon Jeong, Jeong-Guon Ih

NOVIC center, Dept. Mech. Eng. KAIST Science Town, Taejeon, 305-701, Korea

ihih@mail.kaist.ac.kr

요약

경계요소법을 이용한 음향홀로그래피 구현에 요구되는 많은 측정 노력을 줄이기 위하여 강체 산란체를 이용한 홀로그래피의 기본이론을 제시하였다. 강체산란체를 음장에 위치시켰을 때의 기본이론을 제시하고, 피스톤의 자유공간방사경우에 산란체의 거리의 변화에 따른 음향진동전달함수의 특이성 변화를 관찰하였다.

음장 측정이 필요하다. 이에 따라 음압 측정에 많은 시간과 노력이 들어가고, 이는 음향홀로그래피를 구현하는데 한 장애요소다.

산란체를 이용한 음향홀로그래피에 대한 기본 이론과 산란체형상에 따른 전달함수의 특이성 변화가 2 차원 내부 예제를 통하여 제시되었다[2-5]. 본 연구에서는 2 차원 외부 문제 - 피스톤의 외부 방사문제에 적용하여 산란체와 음원으로부터의 거리에 따른 특이성 변화를 관찰한다..

1. 서론

음향홀로그래피는 음장에서 측정한 음압을 이용하여, 음원의 음향 특성을 재구성하는 방법이다. 음향 홀로그래피의 한 종류인 경계요소법을 이용한 음향홀로그래피는 음원과 음장 사이의 관계를 Kirkhoff-Helmholtz 적분 방정식을 이용하여 나타내고[1], 음원을 경계요소로 나타내기 때문에, 복잡한 형상을 갖는 음원도 나타낼 수 있는 장점이 있다. 음원과 음장의 관계를 나타내는 음향진동전달함수는 ill-posed 된 특성을 극복하기 위해, 음원 경계 요소의 노드 수보다 많은

2. 기본이론

음장의 한 점에서의 음압과 음원과의 관계는 잘 알려진 Kirchoff-Helmholtz 적분방정식을 이용하여 표현할 수 있다. 기하학적으로 불규칙한 면을 갖는 음원을 다루기 위해서, 경계요소 이산화가 필요하고, 이는 벡터와 행렬을 갖는 방정식으로 표현된다.

그림 1 에서처럼, 음장에 강체가 존재할 경우에는, 표면 방정식은 진동하는 음원과 강체로 나뉘 수 있다:

$$[D_s^s][p_s^s] = [M_s^s][v_s^s], \quad (1a)$$

또는

$$\begin{bmatrix} D_s^{ss} D_s^{sr} \\ D_s^{rs} D_s^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s^s \\ p_s^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s^{ss} M_s^{sr} \\ M_s^{rs} M_s^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s^s \\ v_s^r \end{bmatrix}, \quad (1b)$$

여기서, p 와 v 는 각각 음압과 수직속도성분을 나타내고, D 와 M 은 각각 단극원 행렬과 쌍극원 행렬을 나타낸다. 또한, 윗첨자 s 와 r 는 각각 음원과 강체를 나타내고, 아랫첨자 s 와 f 는 각각 음원 표면과 음장을 나타낸다. 음원의 진동으로부터 기인하는 방사 음장은 다음과 같이 음원의 표면 속도와 음압으로 나타낼 수 있다:

$$[p_f] = [D_f^s][p_s^s] + [M_f^s][v_s^s], \quad (2a)$$

또는

$$[p_f] = [D_f^s D_f^r] \begin{bmatrix} p_s^s \\ p_s^r \end{bmatrix} + [M_f^s M_f^r] \begin{bmatrix} v_s^s \\ v_s^r \end{bmatrix}. \quad (2b)$$

음원의 진동으로부터 기인하는 방사 음장은 다음과 같이 표면속도와 음압으로 나타낼 수 있다. 식(1)를 식(2)에 대입하고, 정리하여 음원 표면의 속도와 음장에서 음압 간의 관계식을 얻을 수 있다.

$$[p_f] = [A] \begin{bmatrix} v_s^s \\ v_s^r \end{bmatrix} \equiv [G] \begin{bmatrix} v_s^s \\ v_s^r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서,

$$[A] = [D_f^s D_f^r] \begin{bmatrix} D_s^{ss} D_s^{sr} \\ D_s^{rs} D_s^{rr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_s^{ss} M_s^{sr} \\ M_s^{rs} M_s^{rr} \end{bmatrix} + [M_f^s M_f^r].$$

행렬 $[G]$ 는 진동음향전달행렬로 정의한다. 강체표면속도는 모두 0 이므로, (3)식은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$p_f = \left\{ [D_f^s D_f^r] \begin{bmatrix} D_s^{ss} D_s^{sr} \\ D_s^{rs} D_s^{rr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_s^{ss} \\ M_s^{rs} \end{bmatrix} + [M_f^s] \right\} [v_s^s] \quad (4)$$

$$\equiv G \cdot v_s^s.$$

그림 2 와 같이 산란체가 R 번 이동하는 경우을 고려해보자. 음원의 속도는 산란체의 존재에 영향을 받지 않는다는 전제 ($[v_s^s]_1 = [v_s^s]_2 = \dots = [v_s^s]_R$) [5] 를 이용하여 식(4)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [p_f]_1 \\ [p_f]_2 \\ \vdots \\ [p_f]_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [G]_1 \\ [G]_2 \\ \vdots \\ [G]_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v_s^s]_1 \\ [v_s^s]_2 \\ \vdots \\ [v_s^s]_R \end{bmatrix} \equiv [G_T][v_s^s]. \quad (5)$$

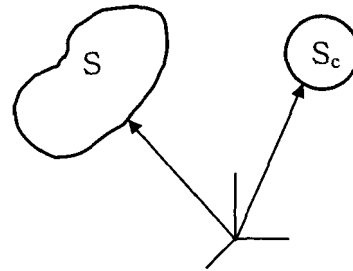


그림 1. 음원과 산란체

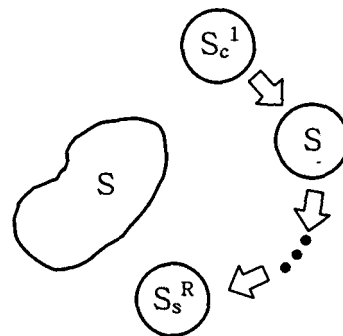


그림 2. 음원과 산란체(R번 이동)

음원의 표면속도 성분은 식(5)에서 전달행렬의

역행렬을 구함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[v_S^s] = ([G_T]^H [G_T])^{-1} [G_T]^H \begin{bmatrix} p_f^1 \\ p_f^2 \\ \vdots \\ p_f^R \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3. 수치예제 - 피스톤 자유방사

3.1 산란체의 유무에 따른 음향 홀로그래피

산란체가 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우에 음압과 전달함수를 구할 수 있고, 이를 (6)에 대입하면, 산란체가 없는 경우를 포함하는 음향 홀로그래피 식을 얻을 수 있다.

$$[v_S^s] = ([G_T]^H [G_T])^{-1} [G_T]^H \begin{bmatrix} p_{f,W/O} \\ p_{f,W/I} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$[G_v] = \begin{bmatrix} G_{W/O} \\ G_{W/I} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

이 식을 이용하면 산란체가 없이 측정된 기존 음향홀로그래피 데이터를 그대로 이용할 수 있다.

3.2 피스톤의 자유방사

본 절에서는 피스톤의 2 차원 공간으로의 자유방사 문제에 적용하여 산란체의 위치가 재구성에 미치는 영향과 측정위치 그리고 파동벡터 필터링의 영향에 대해 알아보았다.

길이 0.7 m 의 피스톤을 48 개의 절점을 갖는 일차선형요소로 모델링 하였다. 상한 주파수는 1/6 기준으로 3.8 kHz 가 된다. 경계조건은 모든 절점에서 v

= 1 m/s 로 하였다. 측정 위치는 피스톤에서 수직거리로 0.007 m 떨어진 곳에서 48 곳에 일렬로 위치시켰다. 산란체는 직선모양으로 48 개의 절점을 갖는 일차선형요소로 음원을 모델링 하였다.

산란체가 있을 경우와 없을 경우 두 번 측정하기 때문에, 총 측정위치 개수 m 은 측정위치 개수의 2 배인 128 개가 된다. 여기에 재구성하기 위한 피스톤 상의 노드는 48 개로 over-determination 을 만족한다. 주파수는 100 Hz 로 고정하였다.

실제 측정오차를 모사하기 위해 S/N 이 100 인 가우시안 랜덤잡음을 측정 음압에 더해 주어 재구성 하였다.

표 1 에는 또한 전달함수의 특이성을 파악하기 위하여 C_N (condition number)와 재구성오차를 나타냈다. C_N 은 최소특이치에 대한 최대특이치의 비로 정의되며, 잡음에 의한 증폭 오차의 상한선을 나타낸다[6]. 이 C_N 이 급격히 증가하는 d_r 은 재구성 오차가 급증하기 시작하는 d_r 과 일치하였다. 특이성은 재구성하는 개수와 측정 개수만의 함수가 아닌, 음원과 산란체의 거리에서 생기는 음장의 변화에 따라서도 변화함을 알 수 있다. 음원으로부터의 산란체가 멀어질수록 측정에 미치는 산란체의 영향이 줄어들게 되고, 거리가 무한대인 산란체가 없는 경우와 동일한 경우가 된다. 이것은 산란체가 존재하지 않는 물리적인 의미를 지니게 된다. 본 예제에서는 d_r/λ 이 0.1 부근에서부터 급격한 증가로 이어졌다.

4. 결론

강체 산란체를 이동시키면서 음향 홀로그래피에서 측정 개수의 증가 시키는 이론이 제시되었고, 2 차원 공간으로 자유방사하는 피스톤 예제를 통하여, 음원과 산란체의 거리 역시 주요 변수임을 확인하였다.

표 1. 피스톤 표면 속도 재구성 오차

후 기

d_r (m)	d_r/λ	C_N	Error(%)		
			W/O noise	W/ noise	Reg.
0.010	2.941e-3	1.003e3	7.192e-5	5.927e3	1.4526
0.020	5.882e-3	3.008e3	4.078-3	3.050e4	1.4501
0.050	1.471e-2	1.850e5	1.778e-2	3.625e7	1.4050
0.100	2.941e-2	1.147e8	3.877e0	3.948e12	1.3755
0.300	8.824e-2	6.351e15	8.841e9	5.162e23	1.3308
0.500	1.471e-1	3.061e16	1.300e10	9.244e22	1.3308
0.600	1.765e-1	5.858e16	4.502e9	1.714e22	1.2984
0.680	2.000e-1	4.897e16	1.400e10	7.713e22	1.2941
0.800	2.353e-1	4.217e16	2.032e10	6.886e23	1.3041
1.700	5.000e-1	4.125e16	6.2305e9	6.373e22	1.3924

본 연구는 BK21 에서 일부 지원을 받아 진행 되었습니다.

참고문헌

1. B. K. Gardner and R. J. Bernhard, 1988, A noise source identification technique using an inverse Helmholtz integral equation method, Trans. ASME, J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des 110, pp. 84~90, 1995.
2. J.-G. Ih, J.-H. Jeong, S.-I. Kim, "Use of an Additional Scattering Body in the NAH Based on the Inverse BEM," Proc. 9th International Congress on Sound and Vibration, Orlando, Florida, U.S.A, July, 2002
3. S.-I. Kim, J.-H. Jeong, J.-G. Ih, " Use of Additional Scattering bodies in the NAH," Proc. Internoise 2003, pp.2235-2242, August, Jeju, 2003.
4. S.-I. Kim, J.-H. Jeong, J.-G. Ih, "Use of Rigid Scattering Body in the use of NAH based on the inverse BEM," 한국 소음진동공학회 춘계학술대회, pp. 486-489, May, 경주, 2004.
5. J.-S. Lee and J.-G. Ih, On the method for estimating the volume velocity of an acoustic source in a chamber, J. Sound Vib. 182, pp. 505~522, 1995.
6. J. Biemond, R.L. Lagendijk, and R.M. Mersereau, Iterative Methods for Image Deblurring, Proc. IEEE 78, pp. 865~883, 1990.

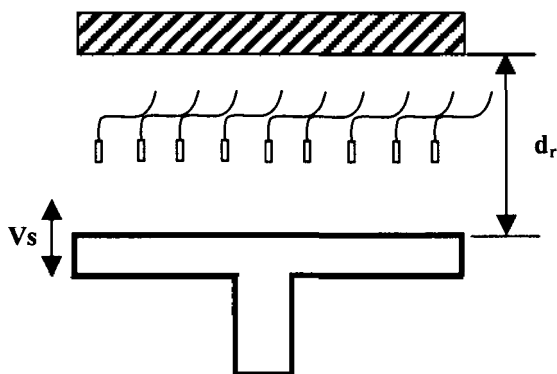


그림 3. 산란체가 존재하는 경우; 피스톤 (아래)와 측정점과 산란체 (위)

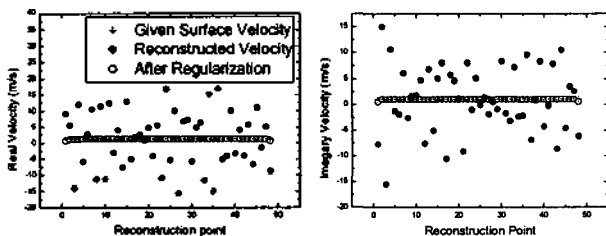


그림 4. 피스톤 표면 속도 재구성