

유한·경계요소법을 이용한 내부음원을 갖는 닫힌 구조물의 차음 특성 해석

The Analysis of Transmission Characteristics of Closed Structure with Internal Source Using FEM/BEM

원성규*·정의봉**·서영수*

Sung Gyu Won, Weui Bong Jung and Young Soo Seo

Key Words : FEM(유한요소법), BEM(경계요소법), coupled system(연성계)

ABSTRACT

In vibro-acoustic analysis, the commercial CAE tools, such as SYSNOISE, is usually used to take into account of the coupled effects of fluid acoustics and structural vibration. The acoustic field can be solved by either FEM or BEM, while the vibration field is usually solved by FEM. The interior or exterior acoustic problems with the coupled effects of the structural boundary could be solved by the commercial tools. The commercial tools, however, could not solve the problems in case that both the interior and exterior acoustic field is coupled with the structural boundary. In this paper, a realistic method based on FEM/BEM coupling scheme is presented to analyze the acoustic radiation from the internal source in a chamber to external acoustic field through elastic structural boundary. Several numerical examples are implemented to validate the developed program.

1. 서론

음향 유한요소법으로 내부 음향을 해석할 때에 구조 유한요소법 (Structure FEM)을 동시에 사용하여 경계조건에 강제 조건 대신 외부 구조물의 특성을 해석에 반영하는 연성방법 (Coupled FEM)이나, 음향 경계요소법에 구조 유한요소법을 동시에 사용하여 경계조건에 임의의 속도조건을 대입하는 대신에 구조물에 가해진 힘에 의해 유발되는 방사 소음을 해석하는 연성방법 (Coupled BEM) 등은 각각 두 개의 상이한 계가 연성된 특성을 알 수 있는 이점이 있으므로 최근까지 널리 이용되고 있는 음향 수치해석 방법이다.

상용 구조/음향 해석도구인 SYSNOISE⁽¹⁾는 각 내부 음장만의 해석, 외부 음장만의 해석, 내부 음장과 구조진동의 연성해석, 외부음장과 구조진동의 연성해석이 가능하지만 내부음장과 구조진동 및 외부음장의 연성을 동시에 고려한 해석은 불가능하다.

본 연구에서는 3 차원 공간에서의 평판 구조물과 내부 음장에 대해서 유한요소법을 적용하고, 외부 음장에 대해서 음향 경계요소법을 사용하여 전체 연성계를 구성함으로써 내부 음장에서 발생한 음원이 닫힌 구조물을 통하여 외부 음장으로 방사될 때의 음향 특성을 해석하고자 한다.

2. 지배방정식

두 개 이상의 연성계를 해석하기 위해서는 두 개의 계가 만날 때 경계에서의 경계조건을 각각의 지배방정식에 대입함으로써 연립방정식을 구성하여야 하며 이 때 경계조건은 연립방정식에서 연성행렬로 표현된다.

구조와 내부음향이 연성된 경우에는 경계면에서 음압이 구조요소에 분포하중으로 작용하고, 구조의 변위는 음장에 음원 (volume velocity)으로 작용한다. 이 경계조건은 식(1)~(2)로 나타낼 수 있다.

$$\{f_{sb}\} = [C_{sb}]\{p_{sb}\} \quad (1)$$

$$\{Q_{nsb}\} = [D_{sb}]\{u_{sb}\} \quad (2)$$

여기서 행렬 C 와 D 는 변환행렬이고 하첨자 sb 는 두 영역이 연성되어 있는 특성을 나타낸다.

진동하는 닫힌 구조물에 대하여 유한요소법을 적용하면 다음과 같은 지배방정식이 구해진다.

$$([K_s] - \omega^2 [M_s])\{u_s\} = \{f_s\} - [C_{sb}]\{p_{sb}\} - [C_{sa}]\{p_{sa}\} \quad (3)$$

여기서 하첨자 s 는 구조물을 의미하며, ω 는 주파수, u_s 는 구조물의 변위, f_s 는 가진력을 나타내며 전체 가진력은 여기에 구조물 내부 및 외부의 음압의 차가 추가된다. 한편 닫힌 구조물의 내

* 부산대학교 기계설계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부

부 음장에 대하여 유한요소법을 적용하면 지배방정식은 다음과 같다.

$$([M_b] - \omega^2 [K_b]) \{p_b\} = \rho \omega^2 [C_b^T] \{u_{nb}\} + \rho \omega^2 \{u_{src}\} \quad (4)$$

여기서 하첨자 b 는 내부 영역을 나타내며, p_b 는 내부 음압이다. u_{nb} 는 음장 경계의 입자변위로 닫힌 구조물의 횡변위를 나타내고 u_{src} 는 내부 음장의 음원이다. 그리고 외부 음장에 대하여 경계요소법을 적용하면 다음과 같은 지배방정식이 구해진다.

$$[H] \{p_a\} = [G] \{v_{na}\} \quad (5)$$

여기서 p_a 는 외부음장 경계에서의 음압이고, v_{na} 는 경계면에서의 입자속도의 수직성분으로 닫힌 구조물의 횡변위로 작용한다.

내부 음향 B 와 경계면 구조물 S 와 외부 유체 A 가 연성된 계를 도식화하면 Fig. 1 과 같고 그 지배방정식은 각 문제영역 사이의 경계조건을 고려하면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_s - \omega^2 K_s & +C_b & +C_a \\ -\rho \omega^2 C_b^T & K_b - \omega^2 M_b & 0 \\ -j\omega G_a T_a^T & 0 & H_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s \\ P_b \\ P_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho \omega^2 U_b \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 행렬 $+C_b, +C_a$ 는 각각 내부음압과 외부음압이 구조물에 외력으로 작용한다는 것을 나타내고, 행렬 $-C_b^T, -G_a T_a^T$ 는 구조물의 변위가 내부음장과 외부음장에 가진원으로 작용한다는 것을 나타낸다.

3. 수치예제

Fig. 2 는 연성계의 해석에 사용된 모델의 각 영역을 나타내고 있으며 요소정보와 사용된 물성치는 각각 표 1~3 에 나타내었다. 이 연성계의 전체 자유도는 811.(125+98*6+98)이다.

3.1 개별 프로그램의 검증

각 독립계의 고유치 해석의 결과를 SYSNOISE 의 해석 결과와 비교하면 표 4 와 같이 구조 고유진동수에서의 작은 차이를 제외하면 거의 같다.

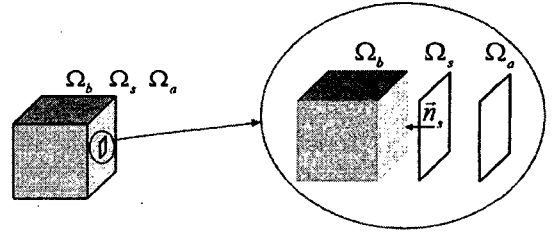
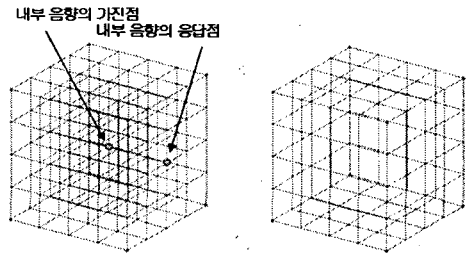
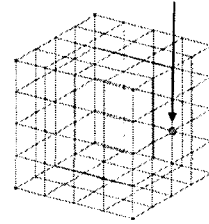


Fig. 1 Coupled domains



(a) Internal acoustic field (b) Boundary structure

외부 음향의 응답점



(c) External acoustic boundary

Fig. 2 Coupled system example

Table. 1 Element information

	Internal Fluid (FEM)	Plate Structure (FEM)	External Fluid (BEM)
No. Node	125	98	98
No. Element	64	96	96

Table. 2 Fluid Properties

Fluid	Density	Sound Speed
Air	1.225 kg / m ³	340 m / s
Water	1000 kg / m ³	1430 m / s

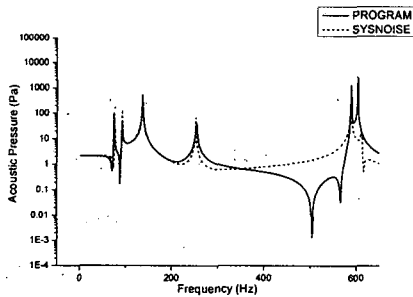
Table. 3 Structure Properties

Structure	Modulus	Density	Thick
Steel	2e11 N / m ²	7850 kg / m ³	0.001 m

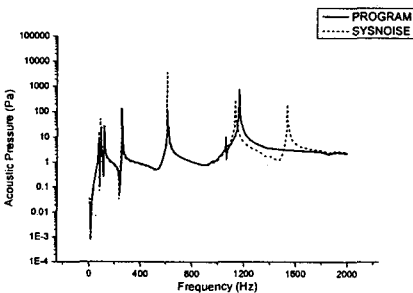
또한 내부음장과 구조만의 연성한 경우와 외부 음장과 구조만의 연성한 경우에 대해서 각각 구조 가진에 의한 내부음압과 외부음압의 계산하여 그 결과를 SYSNOISE의 계산결과와 비교하여 거의 일치하는 결과를 얻었다(Fig. 3(a),(b)).

Table. 4 Natural frequencies of acoustic chamber and boundary structure (Hz)

PROGRAM		SYSNOISE	
structure	acoustic	structure	acoustic
0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	581.32	0.00	581.32
0.01	581.32	0.00	581.32
0.01	581.32	0.00	581.32
0.02	822.11	0.00	822.11
0.02	822.11	0.00	822.11
74.51	822.11	76.04	822.11
74.51	1006.90	76.04	1006.88
92.18	1249.70	92.25	1249.68
92.18	1249.70	92.25	1249.68
92.18	1249.70	92.25	1249.68
116.39	1378.30	115.06	1378.27
196.08	1378.30	193.49	1378.27
196.08	1378.30	193.49	1378.27
196.08	1378.30	193.49	1378.27
233.17	1378.30	235.62	1378.27



(a) Internal acoustic pressure



(b) External acoustic pressure

Fig. 3 Acoustic pressure by force excitation

3.2 내부/외부 유체가 물/공기일 때의 해석결과

단한 구조물과 내부 유체 및 외부 유체의 연성을 동시에 고려한 경우는 SYSNOISE에서 해석이 곤란하다. 따라서 전체 연성계에 대한 프로그램의 해석결과는 비교대상이 없어서 직접 검증할 수가 없다. 여기서는 개발된 프로그램에 의하여 파라미터 변화에 따른 특성을 조사하였다.

Fig. 4(a)~(c)는 내부 유체와 외부 유체를 물 또는 공기로 바꾸면서 내부음장의 중심에서 발생 한 소음에 대해서 경계면의 특정 위치에서의 내부음압과 외부음압을 계산한 결과이다.

Fig. 4(a)는 내부 및 외부가 모두 공기이고 내부에 음원이 있을 경우에 대한 내부 및 외부에서의 음압을 나타낸다. 내부 음압이 외부 음압보다 크며, 주파수가 높을수록 음압의 차이가 커지므로 차음벽의 특성과 잘 부합하고 있음을 알 수 있다.

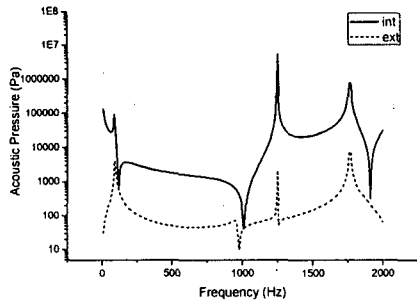
Fig. 4(b)는 내부 유체가 공기이고 외부 유체가 물인 경우이며 낮은 임피던스의 매질에서 높은 임피던스의 매질로의 방사소음이 잘 전달되는 현상을 보여준다. 이 결과는 해양구조물의 내부소음이 외부로 크게 전달되는 현상과 잘 부합된다.

Fig. 4(c)는 내부 유체가 물이고 외부 유체가 공기인 경우이다. 높은 임피던스의 매질에서 구조물을 통하여 낮은 임피던스의 매질로 음파가 전달될 때, 외부에서의 음압은 Fig. 4(b)의 경우보다 크지 않았다.

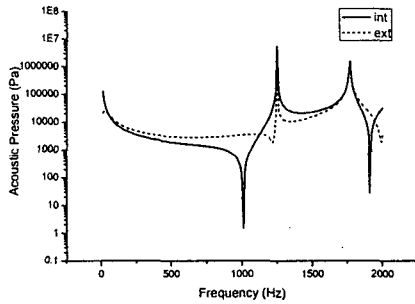
내부 음원에 의하여 발생한 음에 대한 단한 구조물의 음향 투과 특성의 기준으로 식(7)과 같이 인텐시티 저감효과(IR)를 정의하였다. 여기서 IR(Intensity Reduction)은 단한 구조물의 내부 및 외부의 동일 점에서의 음향인텐시티레벨의 차를 의미한다.

$$IR = 10 \log \frac{P_{Int}^2}{\rho_{Int} c_{Int}} - 10 \log \frac{P_{Ext}^2}{\rho_{Ext} c_{Ext}} \quad (7)$$

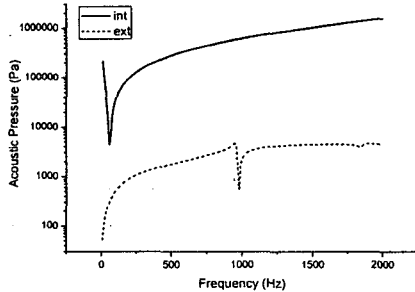
Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 3가지 경우에 대한 IR의 결과이다. 내부 및 외부의 유체가 모두 공기인 경우에 음향 인텐시티 저감효과가 가장 크게 나타났으며, 내부 공기에서 외부 물로의 음향 투과가 내부 물에서 외부 공기로 음향 투과보다 인텐시티 저감효과가 컸다.



(a) Air to Air



(b) Air to Water



(c) Water to Air

Fig. 4 Internal and external acoustic pressure due to internal source

4. 결론

(1) 본 연구에서는 닫힌 구조물에 의해 구분되는 내부음장과 외부음장에 대하여 내부음장과 닫힌 구조물을 FEM 으로 정식화하고, 외부음장을 BEM 으로 정식화하여 이들의 동시 연성계를 구성하였다.

(2) 구성된 연성계로부터 내부음장에서 발생한 음원에 의한 경계면 내외부의 음압을 계산하였고, 그 결과로부터 내외부의 매질을 고려한 닫힌 구조물의 소음의 투과특성을 파악할 수 있었다.

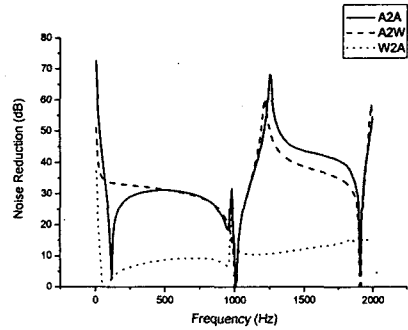


Fig. 5 Acoustic intensity reduction through structure (A2A : Air to Air, A2W : Air to Water, W2A : Water to Air)

(3) 내부 및 외부의 유체가 모두 공기로 동일한 경우는 차음벽의 일반적인 경향과 비슷하게 나타났다.

(4) 내부 유체가 공기이고 외부 유체가 물인 경우 음향 인텐시티의 저감효과는 컸으나 외부 음압이 내부 음압보다 오히려 커짐을 확인하였다.

(5) 내부 유체가 물이고 외부 유체가 공기인 경우 음향 인텐시티의 저감효과는 크지 않았으나 외부 음압의 크기는 내부 음압보다 현저히 작았다.

참고 문헌

- (1) SYSNOISE ver.5.3 Manual, "Multi-model architecture" LMS International
- (2) Maurice Petyt, 1990, Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Press
- (3) O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, 1999, The Finite Element Method 5th Ed. Vol. 2: Solid Mechanics, Butterworth Heinemann
- (4) 加川幸雄, 1990, 有限要素法による振動・音響工学/基礎と應用 5th Ed., 培風館
- (5) T. W. Wu, 2000, Boundary Element Acoustics Fundamentals and Computer Codes, WIT Press
- (6) Lawrence E. Kinsler, 2000, Fundamentals of Acoustics 4th Ed., John Wiley & Sons
- (7) Mutsuto Kawahara, 有限要素法 流體解析, 遠彰出版社, 1995
- (8) Marc Dhainaut and Ulf R. Kristiansen and Paul J.T. Filippi, 1999, "Sound Radiated in a Cavity by a Vibrating Plate: Comparison between the Results of a Finite Element Method (FEMAK) and a Boundary Element Method(NoVAIlea2D)", Flow Turbulence and Combustion 61: 43-53
- (9) MSC/Nastran 2001 Quick Reference Guide, MSC Software Corporation, 2001