

임의 형상 음향 공동의 고유치 정밀도 저하 문제 극복을 위한 NDIF법 응용: 제1부(이론 정립과 검증)

Application of NDIF Method for Overcoming the Problem of Lowering the Eigenvalue Accuracy of Arbitrarily Shaped Acoustic Cavities : Part 1 (Theoretical Formulation and Verification)

강 상 욱[†]

Sang Wook Kang[†]

(Received June 2, 2023 ; Revised July 10, 2023 ; Accepted July 10, 2023)

Key Words : Two-dimensional Acoustic Cavity(2차원 음향 공동), Spurious Eigenvalue(허위 고유치), Eigenvalue (고유치), Eigenmode(고유모드), NDIF Method(무차원 동영향 함수법), Decrease in Accuracy(정밀도 저하), Matrix Rank(행렬 랭크), Finite Element Method(유한요소법), Boundary Element Method(경계요소법)

ABSTRACT

This study evaluates the problem that changing the frequency range of interest reduces the accuracy of the eigenvalues of two-dimensional acoustic cavities obtained by the existing NDIF method. Remarkably, a method of removing variables related to the frequency range of interest from the equation for calculating the determinant of the system matrix, which gives eigenvalues of the acoustic cavities, is proposed, to solve the problem of lowering the accuracy of the eigenvalues. The validity and accuracy of the proposed method are shown through an example verification for a circular acoustic cavity with the exact solution. In the paper to be published, example studies on arbitrarily shaped acoustic cavities with various shapes will be conducted.

1. 서 론

무차원 동영향 함수법(non-dimensional dynamic influence function method, 이하 NDIF법)⁽¹⁻³⁾은 저자가 임의 형상 멤브레인, 음향 공동, 평판의 고정밀도 고유치 해석을 위해 개발한 세미 수치해석법(semi-numerical analysis method)이다. NDIF법은 경계요소법(boundary element method, BEM)^(4,5)처럼 해석 대상물의 내부를 제외한 경계만을 이산화하며,

경계요소법과는 차별적으로 요소(element)를 사용하지 않고 노드만으로 해석 대상물의 경계를 이산화한다. 일반적으로, 경계요소법에서 요소를 구성하기 위해 노드와 노드 사이에 사용하는 보간함수(interpolation function)는 지배방정식을 만족하지 않기 때문에, 이들 보간함수에 대해 특이치 적분을 수행하는 과정에서 수치 해석 오차가 발생하게 된다. 이러한 이유로 인해 경계요소법은 정밀도의 한계를 가지게 되며, 경계요소법과 마찬가지로 해석대상물의 내부를 이산화하기 위해 요소를 사용하는 유한요소법⁽⁶⁾도 비슷한

[†] Corresponding Author ; Member, Hansung University, Professor
E-mail : swkang@hansung.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Seong Yong Wie
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이유로 인해 정밀도 한계를 가진다.

NDIF법은 위에서 설명한 경계요소법과 유한요소법과는 차별적으로 이산화 과정에서 요소를 사용하지 않고 노드만을 사용하며, 근사 해 구성을 위한 기저함수(basis function)가 지배방정식을 정확히 만족하기 때문에, 고정밀도 해석이 가능한 장점을 가진다. 저자는 멤브레인에 적용한 NDIF법을, 임의의 형상 음향 공동의 고유치 해석(7~10)과 다양한 경계조건을 가지는 임의의 형상 평판의 자유 진동 해석(11~15)으로 응용 확장한 다양한 연구를 성공적으로 수행하였다.

그러나 NDIF법은 노드 수를 증가시킬 경우 저주파수 대역의 고유치가 추출되지 않는 약점을 가지는데, 최근의 멤브레인에 대한 연구(16,17)에서 이러한 약점은 극복되어졌다. 현재 멤브레인에 대한 위의 연구 결과를 음향 공동과 평판으로 확대하는 연구가 수행 중에 있으며, 그 결과물 중의 하나로 음향 공동에 대한 연구 성과가 가장 최근에 발표되었다(18,19). 이 연구에서는, 멤브레인과는 달리 허위고유치(2,10)가 발생하는 복잡성을 가진 음향 공동에 대해 (노드 수가 증가하더라도) 전 주파수 대역 고유치와 고유모드의 정확한 추출이 가능한 NDIF법 이론 정식화가 성공적으로 이루어졌다(18,19). 하지만, 관심 주파수 범위를 변경할 경우 저차의 고유치들의 정밀도가 떨어지는 문제점이 기정립된 NDIF법 이론(18,19)에 존재함이 이 논문에서 밝혀졌다. 이번 연구에서는 위의 문제점을 분석하고 이전의 연구 결과를 응용 확장하는 방법에 의해, 임의의 형상 음향 공동의 전 주파수 대역 고유치 추출 기법이 새로이 제안된다. 제안된 방법의 타당성과 정확성을 검증하기 위해, 엄밀해가 존재하는 원형 음향 공동에 대한 예제 검증이 수행된다. 또한, 지면 관계 상 별도의 추가 논문에서는 원형 음향 공동 이외의 다양한 임의의 형상 음향 공동들에 대한 예제 검증이 이루어지며, 이를 위해 제안된 방법에 의한 결과(고유치와 고유모드)와 유한요소법(이 논문에서 ANSYS 사용) 결과가 비교 분석된다.

2. NDIF법 이론

2.1 음향 공동에 대한 지배방정식과 경계조건

Fig. 1은 고유치 해석 대상 임의의 형상 음향 공동을 보여준다. 일반적인 고유치 해석 이론에서 음향 공동의 내부 음압은 식 (1)과 같은 헬름홀츠 방정식(Helmholtz

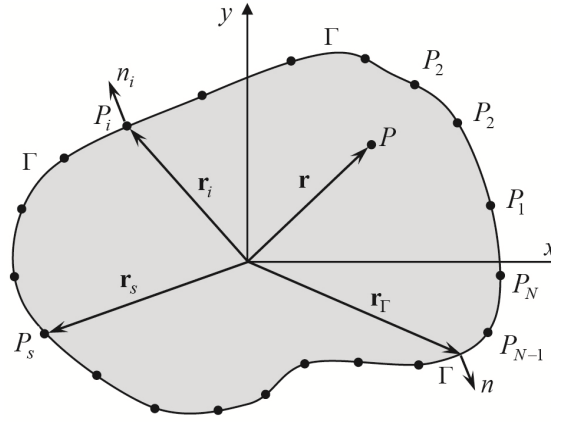


Fig. 1 Arbitrarily shaped acoustic cavity with rigid-wall boundary Γ , which is discretized with boundary nodes P_1, P_2, \dots, P_N

equation) 형태의 지배방정식을 만족한다(20).

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}) + k^2 p(\mathbf{r}) = 0 \tag{1}$$

여기서 k 는 파수(wavenumber)이며 각주파수 ω 와 음속 c 로 구성된 식 $k = \omega/c$ 에 의해 구해진다. 그리고 $p(\mathbf{r})$ 은 Fig. 1에서 음향 공동 내부의 한 점 P 에서의 음압(sound pressure)을 나타내며, \mathbf{r} 은 점 P 에 대한 위치 벡터를 의미한다.

음향 공동의 경계 조건은 강체벽(rigid-wall) 경계 조건과 개방(pressure-released) 경계 조건이 존재하며, 이 논문에서는 가장 일반적인 강체벽 경계 조건만을 고려한다. 강체벽 경계 조건은 식 (2)와 같이 1차 미분 방정식의 형태를 가진다.

$$\frac{\partial p(\mathbf{r}_\Gamma)}{\partial n} = 0 \tag{2}$$

여기서 $p(\mathbf{r}_\Gamma)$ 은 음향 공동 경계 Γ 위의 한 점에서의 음압을 나타내며, \mathbf{r}_Γ 는 Fig. 1에서와 같이 음향 공동 경계 상의 한 점에 대한 위치 벡터이며 n 은 경계 상의 한 점에서의 법선 방향을 의미한다.

2.2 무차원 동영향 함수 정의 및 음압 근사화

NDIF법을 적용하기 위하여 Fig. 1과 같이 음향 공동의 경계 Γ 는 N 개의 노드들 P_1, P_2, \dots, P_N 으로 이산화된다. 다음으로, s 번째 경계 노드 P_s 에 대한 무차원 동영향 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J_0(k|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|) \tag{3}$$

여기서 $J_0(\dots)$ 는 제1종 0차 베셀 함수를 나타내며, 벡터 \mathbf{r}_s 는 경계 Γ 에 위치한 s 번째 노드에 대한 위치 벡터를 의미한다. 참고로, 식 (3)의 무차원 동영향 함수는 물리적으로 노드 P_s 에서 단위 음압이 ω 의 주파수로 발생되었을 때 음향 공동의 내부 점 P 에서의 음압의 크기를 의미한다. 참고로 식 (3)은 지배방정식 식 (1)을 정확히 만족하며 음향 공동의 음압을 구하기 위한 기저 함수로 사용된다.

음향 공동 내부 음압 $p(\mathbf{r})$ 은 경계 노드에서 정의된 무차원 동영향 함수 식 (3)의 선형 결합으로 식 (4)와 같이 근사화된다.

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{s=1}^N A_s J_0(k|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|) \tag{4}$$

여기서 A_s 는 s 번째 노드에서 정의된 무차원 동영향 함수가 내부 음압에 미치는 기여도를 나타내는 계수이다. 참고로, 식 (4) 또한 지배방정식 식 (1)을 만족한다.

2.3 경계 이산화에 의한 시스템 행렬 추출

음향 공동의 경계 Γ 에 주어진 강체벽 경계 조건 식 (2)는 N 개의 경계 노드 P_1, P_2, \dots, P_N 에 대해 식 (5)와 같이 이산화된다.

$$\left. \frac{\partial p(r)}{\partial n_i} \right|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_i} = 0, i = 1, 2, \dots, N \tag{5}$$

여기서 \mathbf{r}_i 와 n_i 는 Fig. 1과 같이 경계 노드 P_i 에 대한 위치 벡터와 법선 벡터를 각각 의미한다.

근사화된 음압 식 (4)를 이산화된 경계조건 식 (5)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{s=1}^N A_s \frac{\partial}{\partial n_i} J_0(k|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_s|) = 0, i = 1, 2, \dots, N, \tag{6}$$

식 (6)에서 법선 방향 n_j 에 대한 미분을 수행하면, 식 (7)이 얻어진다.

$$\sum_{s=1}^N A_s k J_1(k|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_s|) \frac{\partial}{\partial n_i} |\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_s| = 0, i = 1, 2, \dots, N \tag{7}$$

여기서 $J_1(\dots)$ 은 제1종 1차 베셀 함수를 나타낸다.

식 (7)을 행렬식의 형태로 정리하면 식 (8)과 같이 된다.

$$\mathbf{SM}(k)\mathbf{A} = 0 \tag{8}$$

여기서 $\mathbf{SM}(k)$ 는 파수 k 를 변수로 가지는 시스템 행렬이고, \mathbf{A} 는 기여도 벡터를 의미하며 벡터 \mathbf{A} 의 s 번째 성분은 A_s 이다. 시스템 행렬 $\mathbf{SM}(k)$ 의 성분은 식 (9)에 의해 주어진다.

$$\mathbf{SM}_{is} = k J_1(k|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_s|) \frac{\partial}{\partial n_i} |\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_s| \tag{9}$$

음향 공동의 고유치는 식 (8)에서 주어진 시스템 행렬 $\mathbf{SM}(k)$ 의 판별식을 계산함으로써 추출될 수 있다. 음향 공동의 고유치들은 식 (10)을 만족하는 파수 값들과 일치한다.

$$\det(\mathbf{SM}(k)) = 0 \tag{10}$$

하지만, 식 (10)에 의해 구해진 고유치들 속에는 음향 공동고유치 이외의 허위 고유치들(spurious eigenvalues)이 포함되어 있다. 이들 허위 고유치들은 음향 공동과 동일한 형상을 가진 멤브레인의 고유치들에 해당됨이 과거 연구^(2,3)에서 밝혀졌다. 허위 고유치가 발생하는 이유는 시스템 행렬 $\mathbf{SM}(k)$ 이 멤브레인에 대한 시스템 행렬 $\mathbf{SM}_{mem}(k)$ 와 식 (11)과 같이 종속되어 있기 때문이다.

$$\mathbf{SM}(k) = \mathbf{SM}_{mem}(k)\mathbf{SM}_{net}(k) \tag{11}$$

여기서 행렬 $\mathbf{SM}_{net}(k)$ 은 허위 고유치를 제외한 음향 공동 고유치만을 제공하는 시스템 행렬을 의미한다. 식 (11)의 양변에 대한 판별식 값을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\det(\mathbf{SM}(k)) = \det(\mathbf{SM}_{mem}(k))\det(\mathbf{SM}_{net}(k)) \tag{12}$$

식 (12)에서 $\det(\mathbf{SM}_{net}(k)) = 0$ 을 만족하는 파수 값들이 음향 공동의 고유치와 정확히 일치하며, 식 (12)를 이용하면 $\det(\mathbf{SM}_{net}(k)) = 0$ 은 식 (13)으로 대체 가능하다.

$$\det(\mathbf{SM}_{net}(k)) \equiv \frac{\det(\mathbf{SM}(k))}{\det(\mathbf{SM}_{mem}(k))} = 0 \tag{13}$$

식 (13)으로부터 허위고유치를 제외한 음향 공동의 고유치만을 구할 수 있다. 아울러, 음향 공동의 j 번째 고유모드 형상은 j 번째 고유치를 식 (8)에 대입하여 j 번째 기여도 벡터를 구하고, 이 기여도 벡터의 성분

값들과 j 번째 고유치를 식 (4)에 대입하는 방법에 의해 구해진다.

3. 기존 NDIF법 문제점 해결 방안 제안

3.1 고유치 정밀도 저하 문제 분석

NDIF법에서 해석 대상 음향 공동의 고유치를 추출하기 위해선 관심 주파수 범위를 설정해야 하는데, 이 논문에서는 관심 주파수 범위의 변화에 따라 추출

되는 고유치의 정밀도 저하가 발생하는 문제점을 해결하고자 한다. 이러한 정밀도 저하 현상을 면밀히 분석하기 위해 Fig. 2와 같은 엄밀해⁽²¹⁾가 존재하는 원형 음향 공동이 고려된다. NDIF법을 적용하기 위하여 Fig. 2와 같이 음향 공동의 경계는 32개의 노드로 이산화된다. 식 (13)을 이용하여 원형 음향 공동에 대한 판별식 곡선을 그리면 Fig. 3의 실선과 같다.

Fig. 3의 실선을 살펴보면, 저주파수 영역에서 판별식 곡선이 발산함을 확인할 수 있다. 이러한 발산 원인은 식 (14)⁽²²⁾를 이용하여 설명할 수 있다.

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{net}}(k)) = \frac{\det(\mathbf{SM}(k))}{\det(\mathbf{SM}_{\text{mem}}(k))} = \frac{\prod_{i=1}^s \lambda_i^{(c)}}{\prod_{i=1}^s \lambda_i^{(m)}} \tag{14}$$

여기서 $\lambda_i^{(c)}$ 와 $\lambda_i^{(m)}$ 은 각각 시스템 행렬 \mathbf{SM} 과 $\mathbf{SM}_{(\text{mem})}$ 의 i 번째 고유치, S 는 시스템 행렬의 크기를 의미한다. 식 (14)는 Fig. 3의 실선을 그리기 위해 NDIF법에서 사용되는 판별식이며, 맨 우측 식의 분자와 분모 값을 계산해서 판별식 곡선이 그려진다. 저주파수 영역에서 시스템 행렬 \mathbf{SM} 또는 $\mathbf{SM}_{(\text{mem})}$ 의 랭크가 풀 랭크(full rank)가 아니라면, $\lambda_i^{(c)}$ 와 $\lambda_i^{(m)}$ 중 일부가 무의미한 값을 가지게 되어 식 (14)가 발산하게 된다는 것을 최근 연구^(18,19)에서 검증하였다. 그리고 이러한 발산 현상을 방지하기 위해 식 (14)를 보완한 식 (15)가 최근 연구에서 제안되었다.

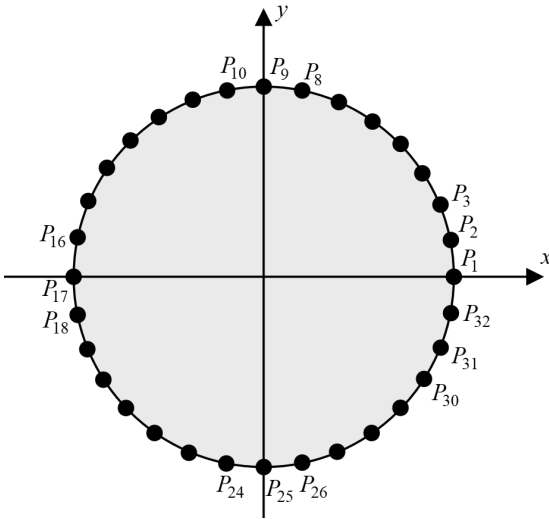


Fig. 2 Circular acoustic cavity of unit radius discretized with 32 boundary nodes

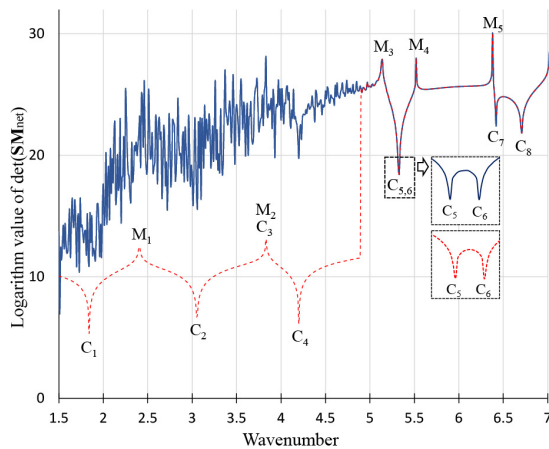


Fig. 3 Determinant curve for the circular acoustic cavity (solid line: original NDIF method, dotted line: improved NDIF method)

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{net}}(k)) = \begin{cases} \frac{\prod_{i=1}^{\min(R_c(k))} \lambda_i^{(c)}}{\min(R_m(k))}, & k < k_b \\ \prod_{i=1}^s \lambda_i^{(m)} \\ \frac{\prod_{i=1}^s \lambda_i^{(c)}}{\prod_{i=1}^s \lambda_i^{(m)}}, & k \geq k_b \end{cases} \tag{15}$$

여기서 $R_c(k)$ 와 $R_m(k)$ 은 파수 k 에 따라 변하는 \mathbf{SM} 와 $\mathbf{SM}_{(\text{mem})}$ 의 랭크 함수(rank function)를 각각 의미하며 Fig. 4에 제시되었다. 그리고 $\min(R_c(k))$, $\min(R_m(k))$ 은 관심 파수 구간 $k_{\text{min}} \leq k \leq k_{\text{max}}$ 에서 R_c 와 R_m 의 최소값을 각각 의미한다. 일반적으로, 파수와 랭크는 비례하므로, 관심 파수 구간에서 랭크의 최소값은 식 (16)과 식 (17)과 같이 최소 파수일때의 랭크 값이다.

$$\min(R_c(k))=R_c(k_{\min}), \tag{16}$$

$$\min(R_m(k))=R_m(k_{\min}) \tag{17}$$

예를 들어, 현재의 예제인 Fig. 3의 경우는 $k_{\min} = 1.5$ 이므로 Fig. 4로부터 식 (18)과 식 (19)와 같이

$$\min(R_c(k))=R_c(1.5) = 19, \tag{18}$$

$$\min(R_m(k))=R_m(1.5) = 19 \tag{19}$$

임을 알 수 있다. 또한 k_b 는 **SM**이 풀 랭크 값을 가지기 시작하는 파수를 의미하며, Fig. 4로부터 $k_b = 4.8$ 임을 알 수 있다. 식 (15)를 사용하여 판별식 곡선을 그리면 Fig. 3의 점선과 같이 저주파수 범위에서 판별식 값이 발산하는 현상이 사라지면서 저주파수 고유치들($C_1 \sim C_4$)이 엄밀해와 정확히 일치된 값으로 성공적으로 추출됨이 확인되었다.

그런데, 만약 관심 파수의 최소값 k_{\min} 을 변화시킨

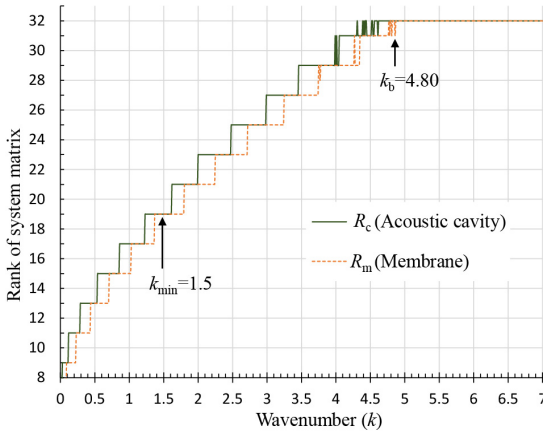


Fig. 4 Rank functions $R_c(k)$ and $R_m(k)$ of the acoustic cavity and membrane discretized using 32 nodes, respectively

Table 1 First four eigenvalues of the circular acoustic cavity obtained by the previous NDIF method and the exact solution⁽²¹⁾ as k_{\min} is changed (parenthesized values denote errors [%] with respect to the exact solution)

	Previous NDIF method					Exact solution
	$k_{\min} = 1.5$	$k_{\min} = 1.0$	$k_{\min} = 0.8$	$k_{\min} = 0.5$	$k_{\min} = 0.2$	
C1	1.8412 (0.00)	1.8412 (0.00)	1.8412 (0.00)	1.8412 (0.00)	1.8412 (0.00)	1.8412
C2	3.0542 (0.00)	3.0542 (0.00)	3.0542 (0.00)	3.0542 (0.00)	3.0523 (0.06)	3.0542
C3	3.8317 (0.00)	3.8317 (0.00)	3.8317 (0.00)	3.8317 (0.00)	3.8304 (0.03)	3.8317
C4	4.2012 (0.00)	4.2012 (0.00)	4.2007 (0.01)	4.1952 (0.14)	4.1589 (1.01)	4.2012

다면 식 (15) 속에 포함된 $\min(R_c(k))$ 와 $\min(R_m(k))$ 의 값도 변하게 되어서, 식 (15)가 k_{\min} 에 종속되는 문제점이 존재한다. Table 1은 k_{\min} 을 변화시켰을 때 식 (15)에 의해 구해진 저주파수 고유치들의 정밀도 저하 현상을 보여준다. $k_{\min} = 1.5$ 일 때는 구해진 고유치 4개 모두가 엄밀해와 정확히 일치하나, k_{\min} 이 작아 짐에 따라 고유치들의 정밀도 저하가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 정밀도 저하의 원인은, k_{\min} 이 작아지면 $\min(R_c(k))$ 와 $\min(R_m(k))$ 도 동시에 작아지기 때문에 $\lambda_i^{(c)}$ 와 $\lambda_i^{(m)}$ 값들 중 유의미한 값들이 식 (15)의 계산에서 제외되기 때문인 것으로 분석된다.

3.2 고유치 정밀도 저하 문제 해결 방안 제안

관심 파수의 최소값 k_{\min} 의 변화에 의한 고유치 정밀도 저하 문제점을 해결하기 위해, 이전 연구에서 제안된 식 (15)를 개선하고자 한다. 유의미한 $\lambda_i^{(c)}$ 와 $\lambda_i^{(m)}$ 값들이 식 (15)를 계산할 때 제외되지 않도록 하기 위해, 이 연구에서는 k_{\min} 에 종속되지 않는 식 (20)을 제안한다.

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{net}}(k)) = \frac{\prod_{i=1}^{R_c(k)} \lambda_i^{(c)}(k)}{\prod_{i=1}^{R_m(k)} \lambda_i^{(m)}(k)} \tag{20}$$

여기서 랭크 함수 $R_c(k)$ 와 $R_m(k)$ 은 Fig. 4의 의해 주어진다. 참고로, 식 (20)의 추가적인 장점은 파수 값 k_b 를 기준으로 양쪽 구간에 대해 두 개의 식으로 분리되는 식 (15)와 다르게 하나의 식으로 시스템 행렬의 판별식을 계산할 수 있다는 것이다.

새로이 제안된 식 (20)을 사용하여 구한 원형 음향 공동에 대한 판별식 곡선은 Fig. 5에 제시되었다. 이 판별식 곡선으로부터 구한 고유치들($C_1 \sim C_8$)은 곡선에 직접 표시하였다. 이들 고유치들은 엄밀해⁽²¹⁾와 정확

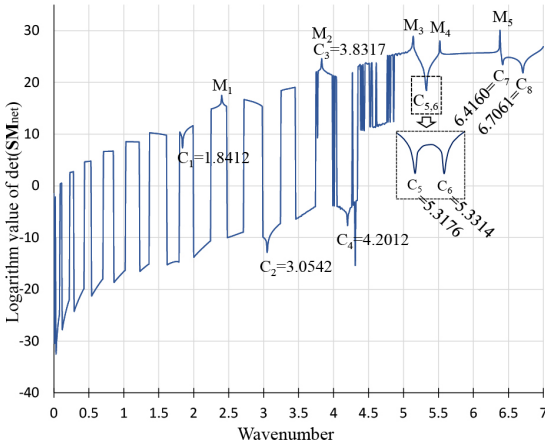


Fig. 5 Determinant curve for the circular acoustic cavity obtained by the proposed NDF method using Eq. (20)

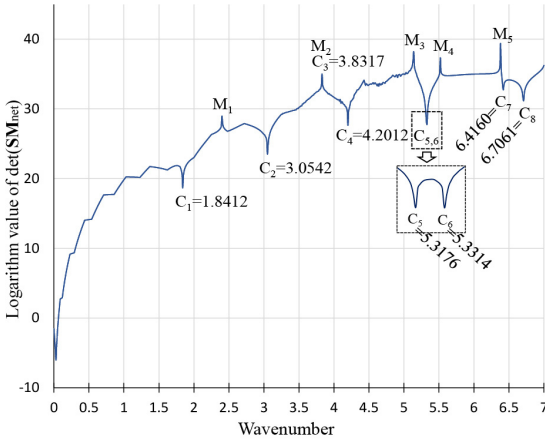


Fig. 6 Determinant curve for the circular acoustic cavity obtained by the proposed NDF method using Eq. (21)

히 일치하는 것으로 확인되며, 새로이 제안된 식 (20)은 타당하고 정확한 것으로 판단된다. 하지만, 이 판별식 곡선은 시스템 행렬이 풀 랭크가 아닌 저주파수 구간(즉, $0 \leq k \leq 4.8$)에서 많은 불연속 지점들을 가진다. 참고로, 이러한 불연속 지점들은 Fig. 4의 두 랭크 곡선에서 불연속 지점들과 정확히 일치한다. 판별식 곡선에서의 이러한 불연속 현상은 고유치를 추출하는 데에 혼선을 줄 수 있기에, 멤브레인에 대한 이전 연구(17)에서도 개발된 불연속 지점 제거 방법을 식 (20)의 분자와 분모에 동시에 응용해서 적용한다. 그

러면, 식 (20)은 식 (21)과 같이 된다.

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{net}}(k)) = \frac{\prod_{i=1}^{R_c(k)} \lambda_i^{(c)}(k) \div \prod \lambda_{\text{add}}^{(c)}(k)}{\prod_{i=1}^{R_m(k)} \lambda_i^{(m)}(k) \div \prod \lambda_{\text{add}}^{(m)}(k)} \quad (21)$$

여기서 $\prod \lambda_{\text{add}}^{(c)}(k)$ 은 음향 공동 시스템 행렬(SM)의 랭크 변화에 의해 추가적으로 곱해지는 고유치들의 곱을 의미하며, $\prod \lambda_{\text{add}}^{(m)}(k)$ 은 멤브레인 시스템 행렬(SM_(mem))의 랭크 변화에 의해 추가적으로 곱해지는 고유치들의 곱을 의미한다.

식 (21)를 사용하여 구한 판별식 곡선은 Fig. 6과 같다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교해보면, 새로 제안된 식 (21)에 의해 판별식 곡선의 불연속성이 성공적으로 제거되어 졌음을 확인할 수 있으며, 구해진 고유치들(C1 ~ C8)도 엄밀해(21)와 정확히 일치함이 확인되었다.

4. 결 론

기존의 NDF법에서 음향 공동의 고유치를 추출할 때, 관심 주파수 구간을 변경하면 고유치의 정밀도가 저하되는 문제점이 이번 연구에서 확인되었다. 이 논문에서는 시스템 행렬의 판별식을 계산하기 위한 식에서 관심 주파수와 관련된 변수를 제거하는 방법을 제안하여 상기의 고유치 정밀도 저하 문제를 해결하였다. 아울러, 새로 제안된 방법에서도 허위 고유치들이 성공적으로 제거됨도 확인되었다. 제안된 방법의 타당성과 정확성은 엄밀해가 존재하는 원형 음향 공동에 대한 예제 검증을 통해 보여주었으며, 이어서 발표될 논문에서는 다양한 형상을 가진 임의 형상 음향 공동에 대한 예제 연구들이 수행될 예정이다.

후 기

이 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원 과제임.

References

(1) Kang, S. W. and Lee, J. M., 1999, Vibration Analysis of Arbitrarily Shaped Membranes Using Non-dimensional Dynamic Influence Function, Journal of Sound and Vibration, Vol. 221, No. 1, pp. 117~132.

- (2) Kang, S. W. and Lee, J. M., 2000, Application of Free Vibration Analysis of Membranes Using the Non-dimensional Dynamic Influence Function, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 234, No. 3, pp. 455-470.
- (3) Kang, S. W. and Lee J. M., 2001, Free Vibration Analysis of Arbitrarily Shaped Plates with Clamped Edges Using Wave-type Functions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 242, No. 1, pp. 9-26.
- (4) Beskos, D. and Maier, G., 1996, *Boundary Element Advances in Solid Mechanics*, Springer-Verlag, New York.
- (5) Cheng, A. H.-D. and Brebbia, C. A., 2013, *Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods*, WIT Press, Southampton.
- (6) Bathe, K.-J., 1982, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Hoboken.
- (7) Kang, S. W. and Yon, J. I., 2011, Development of an Improved NDIF Method for Efficiently Extracting Eigenvalues and Eigenmodes of Arbitrarily Shaped Acoustic Cavities, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 21, No. 10, pp. 960-966.
- (8) Kang, S. W. and Atluri, S. N., 2014, Application of Nondimensional Dynamic Influence Function Method for Eigenmode Analysis of Two-dimensional Acoustic Cavities, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6, 363570.
- (9) Kang, S. W. and Atluri, S., 2015, Improved Non-dimensional Dynamic Influence Function Method Based on Two-domain Method for Vibration Analysis of Membranes, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 2, 1687814015571012.
- (10) Kang, S. W., 2018, Extraction of Highly Accurate Eigenvalues of Arbitrarily Shaped Acoustic Cavities with a Mixed Boundary, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 542-547.
- (11) Kang, S. W. and Atluri, S. N., 2009, Free Vibration Analysis of Arbitrarily Shaped Polygonal Plates with Simply Supported Edges Using a Sub-domain Method, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 327, No. 3-5, pp. 271-284.
- (12) Kang, S. W. and Yon, J. I., 2012, Development of the NDIF Method Using a Sub-domain Method Approach for Extracting Highly Accurate Natural Frequencies of Arbitrarily Shaped Plates, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 830-836.
- (13) Kang, S. W. and Atluri, S., 2016, Improved Non-Dimensional Dynamic Influence Function Method for Vibration Analysis of Arbitrarily Shaped Plates with Clamped Edges, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 3, 1687814016638586.
- (14) Kang, S. W., 2017, New Formulation of NDIF Method for Highly Accurate Eigenvalue Analysis of Arbitrarily Shaped Plates, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 622-628.
- (15) Kang, S. W., 2018, Efficient Meshless Method for Eigenvalue Analysis of Plates with Clamped and Simply Supported Boundary Conditions, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 118-124.
- (16) Kang, S. W., 2022, Efficient Higher-order Eigenvalue Analysis of Arbitrarily Shaped Membranes Using NDIF Method, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 46, No. 1, pp. 57-63.
- (17) Kang, S. W., 2022, Improvement of Eigenvalue Extraction Method in the NDIF Method for Free Vibration Analysis of Arbitrarily Shaped Membranes, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 97-104.
- (18) Kang, S. W., 2023, Development of Modified NDIF Method for Extracting Eigenvalues in Entire Frequency Range of Arbitrarily Shaped Acoustic Cavities: Part 1 (Theoretical Formulation), *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 44-50.
- (19) Kang, S. W., 2023, Modified NDIF Method for Extracting Eigenvalues in Entire Frequency Range of Arbitrarily Shaped Acoustic Cavities: Part 2 (Example Studies and Consideration), *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 33,

No. 1, pp. 99~107.

(20) Hall, D. E., 1987, Basic Acoustics, John Wiley & Sons, Singapore.

(21) Blevins, R. D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold, New York.

(22) Nering, E. D., 1970, Linear Algebra and Matrix Theory (2nd ed.), John Wiley & Sons, New York.



Sang Wook Kang received a B.S., M.S. and Ph.D. degree in Dept. of Mechanical Design Engineering from Seoul National University in 1992, 1994 and 1999, respectively. He is currently working in Hansung University as a professor of the mechanical system engineering. His research interests include the development of NDIF method for free vibration analysis of membrane, acoustic cavities, and plates with general shapes.