

혼합 경계를 가진 임의 형상 음향 공동의 저주파수 고유치 미 추출 문제 해결을 위한 NDIF법 개발

Development of NDIF Method to Solve the Non-extraction Problem of Low-frequency Eigenvalues for Arbitrarily-shaped Acoustic Cavities with a Mixed Boundary

강 상 옥[†]

Sang Wook Kang[†]

(Received July 15, 2024 ; Revised August 8, 2024 ; Accepted August 12, 2024)

Key Words : Acoustic Cavity(음향 공동), Mixed Boundary(혼합 경계), Low Order Eigenvalue(저차 고유치), NDIF Method(무차원 동영향 함수법), Matrix Rank(행렬 랭크), FEM(유한요소법), BEM(경계요소법)

ABSTRACT

The NDIF method is a numerical analysis technique that was developed for high-precision eigenvalue analysis of arbitrarily shaped acoustic cavities. It is characterized by a limitation where the precision of higher-order eigenvalues increases, but low-order eigenvalues are not extracted as the number of nodes increases. In a recent study, a practical method was developed to overcome this limitation in acoustic cavities with rigid-wall boundaries. In this study, the practical method was applied and extended to acoustic cavities with mixed boundaries, comprising rigid-wall and open boundaries. To verify the validity and accuracy of the proposed method, example studies were conducted on both a rectangular acoustic cavity with a known exact solution and an arbitrarily shaped acoustic cavity. The verification demonstrated that lower-order eigenvalues can be successfully extracted regardless of the number of nodes. In future studies, this method will be applied to acoustic cavities with more diverse shapes and boundary conditions.

1. 서 론

NDIF법(non-dimensional dynamic influence function method, NDIF method)은 임의 형상 음향 공동의 고정밀도 고유치와 고유모드를 추출하기 위해 저차가 처음 개발한 수치해석 기법이다⁽¹⁾. NDIF법은 해석 대상물의 내부를 이산화하는 유한요소법(FEM)과는 달리 해석 대상물의 경계만을 이산화한다⁽²⁾. 그래서

수치 해석 데이터 량이 유한요소법에 비해 훨씬 적은 장점을 가진다. 또한 NDIF법은 유한요소법과는 차별적으로 노드 간에 보간 함수를 사용하지 않기 때문에, 유한요소 해석에서 보간 함수가 지배방정식을 만족하지 않기 때문에 발생하는 오차를 방지할 수 있다. NDIF법은 경계요소법(BEM)과 마찬가지로 해석 대상물의 경계만을 이산화한다⁽³⁾. 하지만 NDIF법은 노드 간에 보간 함수를 사용하지 않기 때문에, 경계요소법에서 특이치 적분 과정에서 발생하는 오차를 미

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

[‡] Recommended by Editor Chan Jung Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

연에 방지할 수 있는 장점을 가진다.

저차는 근래에 NDIF법을 이용하여, 강체벽 경계 (rigid-wall boundary)와 개방 경계(open boundary)가 동시에 존재하는 혼합 경계(mixed boundary)를 가진 음향 공동의 고정밀도 고유치 추출법을 개발하였다(4). 이 연구에서 저차는 두 경계 조건으로부터 얻은 로컬 시스템 행렬을 머지(merge)하여 하나의 글로벌 시스템 행렬을 얻고, 글로벌 시스템 행렬로부터 고정밀도 고유치를 추출하는 방안을 성공적으로 제안하였으나, 제안된 방법은 고차 고유치의 추출 정밀도를 높이기 위해 노드의 개수를 증가시키면 저차 고유치가 추출되지 않는 약점이 있음을 확인하였다. 그래서 저차의 고유치를 얻기 위해서는 노드 수를 줄인 다음 다시 고유치 해석을 해야 하는 번거로움이 존재했다.

NDIF법을 이용한 음향 공동의 고유치 해석에서 저차의 고유치가 얻어지지 않은 현상은 강체벽 경계만을 가진 음향 공동의 경우에도 발생하는 것으로 확인되는데, 강체벽 음향 공동에 대한 저차 고유치 미 추출 문제는 가장 최근 연구에서 성공적으로 해결되었다(5). 이 연구에서는 해당 연구를 응용 확장하여(5), 혼합 경계를 가진 음향 공동의 저차 고유치 미 추출 문제를 해결하기 위한 방안이 제안된다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 엄밀해를 가지는 사각형 음향 공동과 임의의 형상 음향 공동을 이용한 예제 연구가 수행되었다.

2. 혼합 경계 음향 공동에 대한 NDIF법 이론

혼합 경계를 가진 음향 공동에서 저차 고유치가 구해지지 않는 NDIF법의 문제점을 개선하기 위한 방안을 제안하기 앞서, 먼저 혼합 경계를 가진 음향 공동에 대한 NDIF 이론(4)을 간단히 요약한다.

2.1 음향 공동에 대한 지배방정식과 경계조건

Fig. 1에서와 같이, 임의의 형상 음향 공동 내부의 한 점 P 에서의 음압 $P(\mathbf{r})$ 은 식 (1)과 같은 지배방정식을 만족한다.

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

여기서 k 는 파수(wavenumber), \mathbf{r} 은 점 P 의 위치 벡터이다. 음향 공동이 혼합 경계를 가진 경우, 강체벽

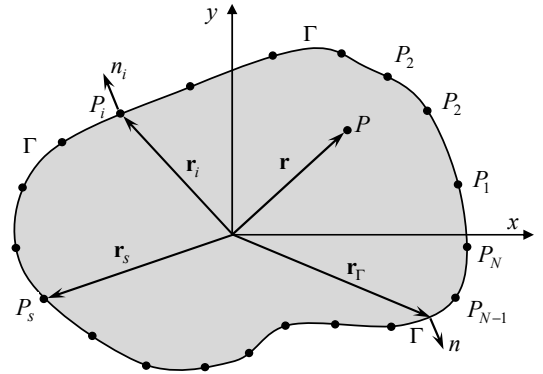


Fig. 1 Acoustic cavity whose boundary Γ is discretized with N nodes(P_1, P_2, \dots, P_N)

경계조건과 개방 경계 조건은 식 (2)와 식 (3)과 같이 각각 주어진다.

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

$$p(\mathbf{r}_\Gamma) = 0 \tag{3}$$

여기서 \mathbf{r}_Γ 와 n 은 음향 공동 경계 상의 한 점에 대한 위치벡터와 법선 방향을 각각 의미한다.

2.2 무차원 동영향 함수 및 시스템 행렬

식 (1)에서 정의한 음향 공동 음압 $P(\mathbf{r})$ 은 식 (4)와 같이 가정한다.

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

여기서 $J_0(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|)$ 는 s 번째 경계 노드에 대한 무차원 동영향 함수(NDIF)로 제1종 0차 베셀 함수이다. 그리고 A_s 는 s 번째 기여도 계수, N 은 경계 노드 개수이다.

경계 조건 식 (2)와 식 (3)을 경계 노드에 대해 이산화하면 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 된다.

$$p(\mathbf{r}_i^{(o)}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_o \tag{5}$$

$$\frac{\partial p(\mathbf{r}_j^{(r)})}{\partial n_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N_r \tag{6}$$

여기서 $\mathbf{r}_i^{(o)}$ 와 $\mathbf{r}_j^{(r)}$ 는 각각 개방 경계와 강체벽 경계 노드에 대한 i 번째와 j 번째 위치벡터를 의미한다. 그리고 N_o 와 N_r 은 각각 개방 경계와 강체벽 경계 노드 개수를 의미하고, n_j 는 j 번째 강체벽 경계 노드의 법선 방향이다.

식 (4)를 식 (5)와 식 (6)에 대입한 후 행렬식으로 변환하는 과정을 거치면 식 (7), 식 (8)과 같은 2개의 로컬 시스템 행렬식이 얻어진다.

$$\mathbf{SM}^{(oo)}(k)\mathbf{A}^{(o)} + \mathbf{SM}^{(or)}(k)\mathbf{A}^{(r)} = \mathbf{0} \tag{7}$$

$$\mathbf{SM}_n^{(ro)}(k)\mathbf{A}^{(o)} + \mathbf{SM}_n^{(rr)}(k)\mathbf{A}^{(r)} = \mathbf{0} \tag{8}$$

여기서 파수 k 의 함수인 로컬 시스템 행렬 $\mathbf{SM}^{(oo)}(k)$, $\mathbf{SM}^{(or)}(k)$, $\mathbf{SM}_n^{(ro)}(k)$, $\mathbf{SM}_n^{(rr)}(k)$ 의 성분은 이전 연구를 참고하면 된다⁽⁴⁾. 식 (7), 식 (8)을 하나의 시스템 행렬식으로 표현하면 식 (9)와 같이 된다.

$$\mathbf{SM}(k)\mathbf{A} = \mathbf{0} \tag{9}$$

여기서 글로벌 시스템 행렬 \mathbf{SM} 과 글로벌 기여도 벡터 \mathbf{A} 는 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$\mathbf{SM}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{SM}^{(oo)}(k) & \mathbf{SM}^{(or)}(k) \\ \mathbf{SM}_n^{(ro)}(k) & \mathbf{SM}_n^{(rr)}(k) \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{(o)} \\ \mathbf{A}^{(r)} \end{bmatrix} \tag{11}$$

2.3 고유치와 고유모드 추출

음향 공동의 고유치는 식 (9)로 주어진 시스템 행렬의 판별식이 0이 되게 하는 파수에 해당된다. 결과적으로 식 (12)의 해가 고유치에 해당된다.

$$\det(\mathbf{SM}(k)) = 0 \tag{12}$$

식 (12)의 해로부터 m 번째 고유치 $\lambda^{(m)}$ 이 구해지며, $\lambda^{(m)}$ 을 식 (9)에 대입하면 식 (13)이 된다.

$$\mathbf{SM}(\lambda^{(m)})\mathbf{A} = \mathbf{0} \tag{13}$$

식 (13)으로부터 m 번째 기여도 벡터 $\mathbf{A}^{(m)}$ 이 구해지며, $\mathbf{A}^{(m)}$ 과 $\lambda^{(m)}$ 을 식 (4)에 대입하면 식 (14)와 같이 m 번째 음향 고유 모드 형상 함수가 구해진다.

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{s=1}^N A_s^{(m)} J_0(\lambda^{(m)}|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|) \tag{14}$$

한편, 식 (12)에 의해 구해진 고유치 속에는 허위 고유치 포함되어 있다⁽¹⁾. 이들 허위 고유치가 제거된 음향 공동 고유치는 식 (15)의 해에 의해 구해진다.

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{net}}) = \det(\mathbf{SM})/\det(\mathbf{SM}_{\text{mem}}) = 0 \tag{15}$$

여기서 \mathbf{SM}_{mem} 은 음향 공동과 같은 형상을 가진 멤브레인의 시스템 행렬과 일치한다.

3. 저차 고유치 미추출 문제 고찰 및 해결 방안

Fig. 2와 같이 혼합 경계를 가진 직사각형 음향 공동이 고려되어진다. 직사각형 음향 공동은 엄밀해(exact solution)가 존재하기 때문에⁽⁶⁾, NDIF법으로 구한 고유치의 고정밀성 확인과 저차 고유치 미추출 현상을 규명하는 데에 용이하다. 이 직사각형 음향 공동의 네 면 중 한 면(점선)은 개방 경계이며 나머지 세 면(실선)은 강체벽 경계이다.

2절에서 설명한 NDIF법을 직사각형 음향 공동에 적용하기 위해 Fig. 2(a)~Fig. 2(c)와 같이 음향 공동의 경계를 총 16개, 20개, 24개의 노드로 각각 이산화 한다. 음향 공동의 강체벽 두 경계가 만나는 코너에서의 법선 방향은 두 경계에서의 법선들의 평균 값으로 설정하였다. 반면에, 강체벽 경계와 개방 경계가 만나는 코너의 법선 방향은 강체벽 경계의 법선 방향과 일치되게 하였다. 이산화한 음향 공동에 기존 NDIF법식 (15)를 적용하면, Fig. 3과 같은 판별식 곡선을 그릴 수 있다. 판별식 곡선에서 극소값에 해당되는 파수(wavenumber) 값이 고유치를 의미한다. 먼저 16개의 노드로 이산화한 경우(실선)를 살펴보면, 6개의 고유치 $\lambda^{(1)} \sim \lambda^{(6)}$ 가 정확히 추출되었음을 확인할 수 있다. 그러나 노드의 개수를 20개와 24개로 증가시킨 경우(점선과 일점쇄선), 저주파수 영역에서 판별식 곡선이 발산하는 현상이 발생한다. 특히, $N=20$ 인 경우 세 번째 고유치 보다 조금 큰 지점(A로 표시한 지점)에서도 발산 현상이 보인다. 이러한 발산 현상은 NDIF법의 가장 큰 약점으로, 이 연구에서 이 약점을 극복하기 위한 방안이 제안된다.

Fig. 3의 관별식 곡선으로부터 얻은 고유치들은 Table 1에 요약되었다. Table 1을 살펴보면, 단지 16 개의 노드를 사용한 NDIF법이 1271개 노드를 사용한 FEM(ANSYS) 보다 훨씬 더 엄밀해에 근접한 고

유치를 제공함을 확인할 수 있다. 더 나아가 첫 번째~ 네 번째 고유치들은 엄밀해와 정확히 일치함을 확인할 수 있으며, 다섯 번째~여섯 번째 고유치는 엄밀해와 약간의 오차를 가짐도 확인할 수 있다. 이와 같이 고차 고유치가 엄밀해와 일치하지 않는 이유는 노드 수가 부족하기 때문이므로, 노드의 개수를 20개와 24개로 증가시키면, 다섯 번째~여섯 번째 고유치가 정확히 엄밀해에 수렴함을 확인할 수 있다. 하지만, 노드의 개수를 증가시키면 첫 번째 고유치가 구해지지 않는 문제점이 발생했음을 확인할 수 있다⁽⁶⁾.

이전의 연구에서 노드의 개수를 증가시켰을 때 저차 고유치가 구해지지 않는 이유는⁽⁵⁾ 시스템 행렬의

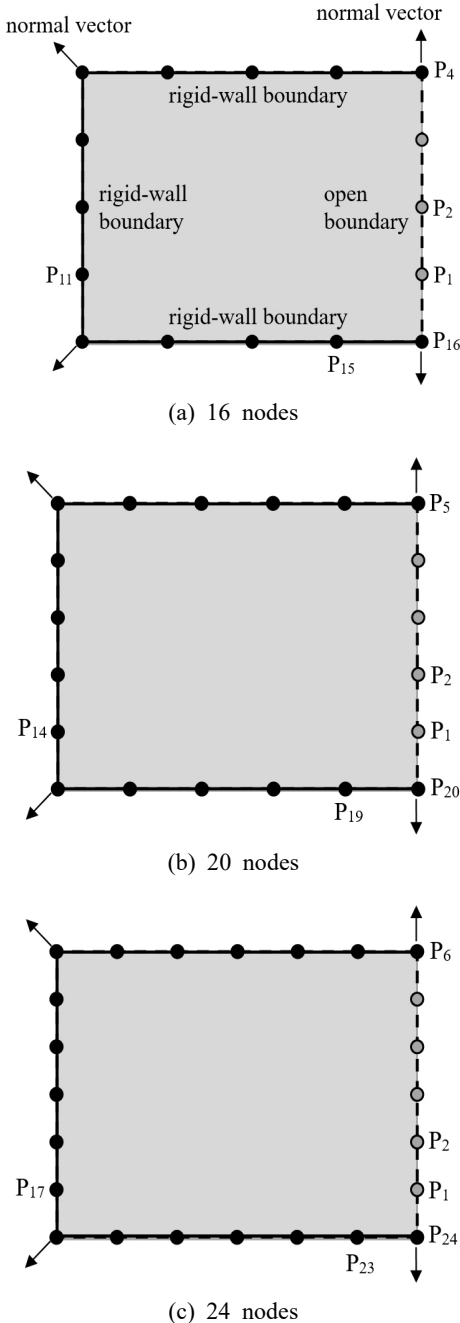


Fig. 2 Rectangular cavity with the mixed boundary condition for $N=16$, $N=20$ and $N=24$

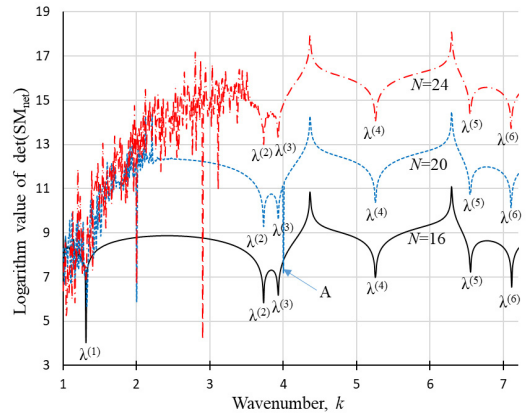


Fig. 3 Determinant curves of the rectangular cavity with the mixed boundary condition for $N=16$, $N=20$ and $N=24$ using Eq. (15)

Table 1 Eigenvalues of the rectangular cavity with the mixed boundary condition, which are obtained by the original NDIF method using Eq. (15), the exact solution and FEM(ANSYS)

	Original NDIF method			Exact solution	FEM (ANSYS) (1271 nodes)
	$N=16$	$N=20$	$N=24$		
$\lambda^{(1)}$	1.309	-	-	1.309	1.308
$\lambda^{(2)}$	3.728	3.728	3.728	3.728	3.729
$\lambda^{(3)}$	3.927	3.927	3.927	3.927	3.926
$\lambda^{(4)}$	5.254	5.254	5.254	5.254	5.253
$\lambda^{(5)}$	6.547	6.545	6.545	6.545	6.551
$\lambda^{(6)}$	7.108	7.103	7.103	7.103	7.115

판별식 값을 계산하는 과정에서 부정확한 값들이 포함되기 때문인 것으로 규명되었다. 보다 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 일반적으로 행렬 \mathbf{M} 의 판별식은 식(16)에 의해 계산된다.

$$\det(\mathbf{M}) = \prod_{j=1}^L \Lambda_j \tag{16}$$

여기서 L 은 \mathbf{M} 의 크기이며 Λ_j 는 식(17)과 같은 대수 고유치 문제를 만족하는 j 번째 고유치이다.

$$\mathbf{M}\mathbf{v}_j = \Lambda_j \mathbf{v}_j \tag{17}$$

여기서 \mathbf{v}_j 는 j 번째 고유 벡터이다. 식(16)은 총 L 개의 고유치를 곱하는 방법의 의해 계산되어 짐을 알 수 있는데, 만약 행렬 \mathbf{M} 의 랭크(rank) R 이 L 보다 작다면, $L-R$ 개에 해당되는 고차 고유치 $\Lambda_{R+1}, \Lambda_{R+2}, \dots, \Lambda_L$ 은 무의미한 고유치가 된다. 이들 고차 고유치가 행렬의 판별식 계산에 포함되게 되면 저주파수 범위에서 시스템 행렬의 판별식 값이 발산하는 현상이 Fig. 3에서와 같이 발생하게 된다. 그래서, 이들 무의미한 고차 고유치들을 제외한 나머지 고유치들만으로 판별식을 계산하기 위해 시스템 행렬을 랭크(rank)를 이용한 식(18)이 제안된다.

$$\det(\mathbf{M}) = \prod_{j=1}^R \Lambda_j \tag{18}$$

여기서 랭크 R 은 파수의 함수임을 숙지해야 한다. 식(18)을 이용하면 식(15)의 분자와 분모는 식(19)와 식(20)에 의해 각각 구해질 수 있다.

$$\det(\mathbf{SM}) = \prod_{j=1}^{R_1(k)} \alpha_j \tag{19}$$

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{mem}}) = \prod_{j=1}^{R_2(k)} \beta_j \tag{20}$$

여기서 $R_1(k)$ 와 $R_2(k)$ 는 각각 \mathbf{SM} 과 \mathbf{SM}_{mem} 의 랭크이며, α_j 와 β_j 는 식(21)과 식(22)와 같은 대수 고유치 문제를 각각 만족하는 j 번째 고유치이다.

$$\mathbf{SM}\mathbf{u}_j = \alpha_j \mathbf{u}_j \tag{21}$$

$$\mathbf{SM}_{\text{mem}}\mathbf{w}_j = \beta_j \mathbf{w}_j \tag{22}$$

여기서 \mathbf{u}_j 와 \mathbf{w}_j 는 각각 식(21)과 식(22)를 만족하는 j 번째 고유 벡터이다. 식(19)와 식(20)을 식(15)에 대입하면 식(23)과 같은 개선된 판별식을 얻을 수 있다.

$$\det(\mathbf{SM}_{\text{net}}) = \prod_{j=1}^{R_1(k)} \alpha_j / \prod_{j=1}^{R_2(k)} \beta_j \tag{23}$$

식(23)을 이용하여 $N=20$ 과 $N=24$ 인 경우에 대하여 직사각형 음향 공동(Fig. 2(b), (c))에 대한 판별식 곡선을 그리면 Fig. 4와 같다. 식(23)을 계산하기 위해 필요한 랭크 $R_1(k)$ 와 $R_2(k)$ 는 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 파수의 함수로 각각 구해졌다. Fig. 5와 Fig. 6에서 실선은 \mathbf{SM} 의 랭크 곡선, 점선은 \mathbf{SM}_{mem} 의 랭크 곡선이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 고주파수 영역으로 갈수록 랭크 값은 시스템 행렬의 크기에 가까워 짐을 알 수 있다. 참고로, 저주파수 영역에서 랭크 값이 시스템 행렬의 크기보다 작아지는 이유는 시스템 행렬의 열 또는 행이 서로 독립적이지 않기 때문이다.

한편 Fig. 4의 판별식 곡선을 Fig. 3과 비교해보면, $N=20$ 과 $N=24$ 인 경우 모두 저주파수 영역에서 시스템 행렬의 발산 현상이 제거되고, 첫 번째 고유치 ($\lambda^{(1)}=1.309$)가 엄밀해와 정확히 일치되게 추출되었음을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 추출된 모든 고유치들은 Table 2에 요약되었으며, 이들 고유치들은 엄밀해와 정확히 일치함이 확인된다⁽⁶⁾.

이상과 같이 이 논문에서 제안된 방법은, 엄밀해가 존재하는 직사각형 음향 공동에 대해 전 주파수 범위에

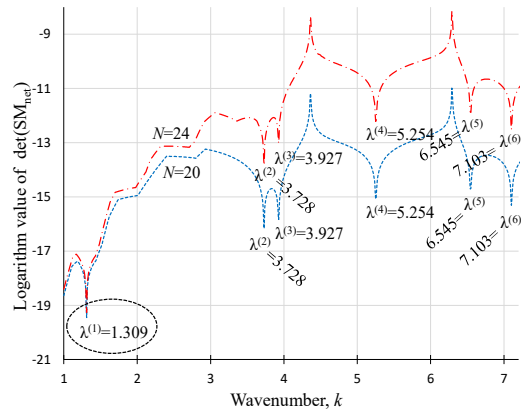


Fig. 4 Determinant curves of the rectangular cavity with the mixed boundary condition for $N=20$ and $N=24$ using Eq. (23)

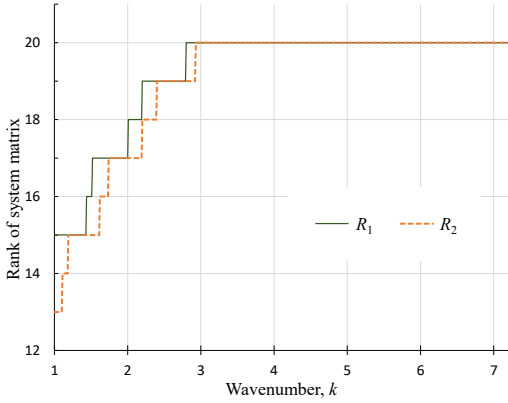


Fig. 5 Ranks of SM and SM_{mem} for the rectangular cavity with the mixed boundary condition for $N=20$

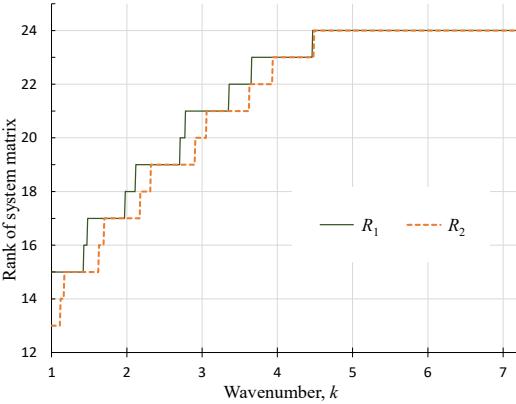


Fig. 6 Ranks of SM and SM_{mem} for the rectangular cavity with the mixed boundary condition for $N=24$

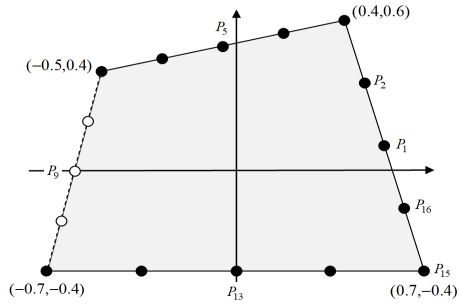
Table 2 Eigenvalues of the rectangular cavity with the mixed boundary condition obtained by the proposed method using Eq. (23) and the exact solution

	$\lambda^{(1)}$	$\lambda^{(2)}$	$\lambda^{(3)}$	$\lambda^{(4)}$	$\lambda^{(5)}$	$\lambda^{(6)}$
Proposed method ($N=20$)	1.309	3.728	3.927	5.254	6.545	7.103
Proposed method ($N=24$)	1.309	3.728	3.927	5.254	6.545	7.103
Exact solution	1.309	3.728	3.927	5.254	6.545	7.103

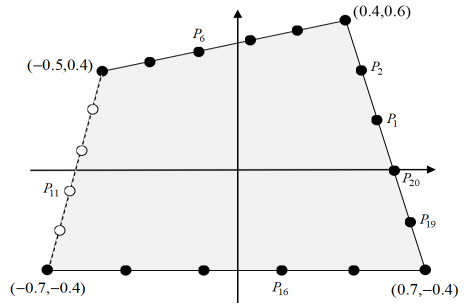
서 정확히 모든 고유치를 추출할 수 있다고 말할 수 있다. 다음 절에서는 엄밀해가 존재하지 않은 임의의 형상 사각형 공동에 제안된 방법을 적용하여 그 타당성을 확인하고자 한다.

4. 임의의 형상 음향 공동 예제 검증

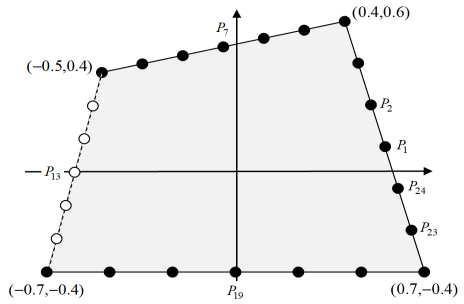
Fig. 7과 같은 임의의 형상 사각 음향 공동이 제안된 방법의 타당성을 확인하기 위해 이용된다. 먼저 Fig. 7(a) ~ Fig. 7(c)와 같이 강체벽 경계(실선)와 개



(a) 16 nodes



(b) 20 nodes



(c) 24 nodes

Fig. 7 Arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition for $N=16$, $N=20$ and $N=24$

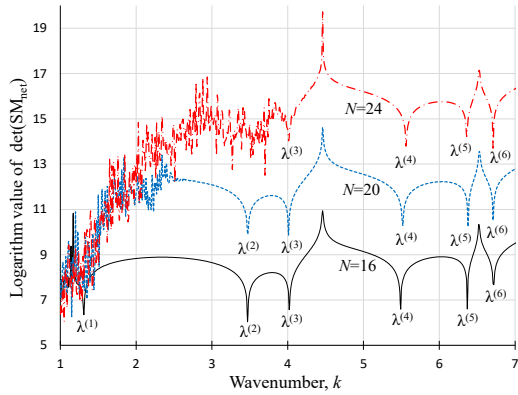


Fig. 8 Determinant curves of the arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition for $N=16$, $N=20$ and $N=24$ using Eq. (15)

Table 3 Eigenvalues of the arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition, which are obtained by the original NDIF method using Eq. (15) and FEM (ANSYS)

	Original NDIF method			FEM(ANSYS)
	$N=16$	$N=20$	$N=24$	1390 nodes
$\lambda^{(1)}$	1.31	-	-	1.31
$\lambda^{(2)}$	3.47	3.47	-	3.50
$\lambda^{(3)}$	4.02	4.01	4.01	4.03
$\lambda^{(4)}$	5.49	5.52	5.56	5.54
$\lambda^{(5)}$	6.37	6.38	6.36	6.37
$\lambda^{(6)}$	6.72	6.71	6.71	6.72

방 경계(점선)로 구성된 음향 공동의 경계를 16개, 20개, 24개의 노드로 각각 이산화 한다. 이들 3개의 이산 모델에 기존 NDIF법 식 (15)를 적용하면, Fig. 8의 판별식 곡선을 얻을 수 있다. 여기서 실선, 점선, 일점쇄선은 각각 노드 16개, 20개, 24개의 노드를 사용한 경우에 대한 판별식 곡선이다. $N=16$ 의 판별식 곡선(실선)을 살펴보면, 첫 번째 ~ 여섯 번째 고유치가 모두 구해졌음을 확인할 수 있다. 그러나, 노드를 20개로 증가시키면 첫 번째 고유치가 구해지지 않고, 노드를 24개로 증가시키면 첫 번째와 두 번째 고유치가 구해지지 않음이 확인된다. 이들 고유치들은 Table 3에 요약되었으며, 1390개의 많은 노드를 사용한 FEM 고유치와 거의 일치한다고 말할 수 있다.

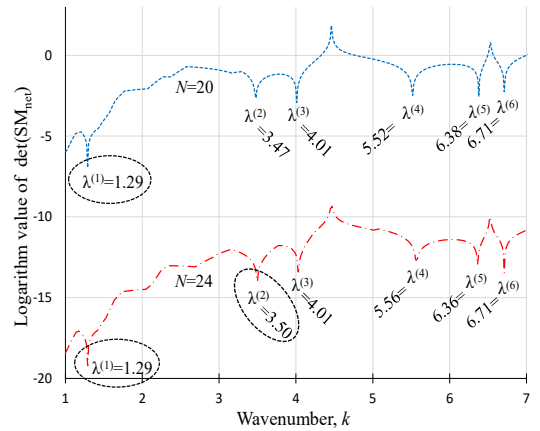


Fig. 9 Determinant curves of the arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition for $N=20$ and $N=24$ using Eq. (23)

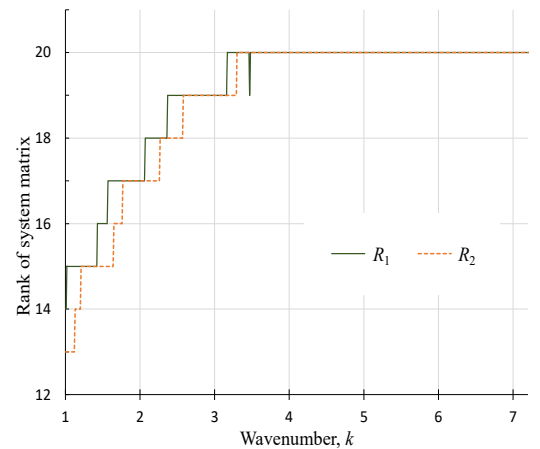


Fig. 10 Ranks of SM and SM_{mem} for the arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition for $N=20$

$N=20$ 과 $N=24$ 인 경우에 저차의 고유치들이 구해지지 않은 문제점을 해결하기 위해, 이 논문에서 제안된 식 (23)을 사용하여 판별식 곡선을 구하면 Fig. 9와 같다. 식 (23) 계산에 필요한 시스템 행렬들의 랭크는 Fig. 10과 Fig. 11과 같이 구해졌다. Fig. 9에서 $N=20$ 의 판별식 곡선(점선)에서 첫 번째 고유치가 1.29로, $N=24$ 의 판별식 곡선(일점쇄선)에서 첫 번째와 두 번째 고유치가 각각 1.29와 3.50으로 성공적으로 구해지는 것을 확인할 수 있다. 이들 고유치들을 1390개의 노드를 사용한 FEM 고유치와

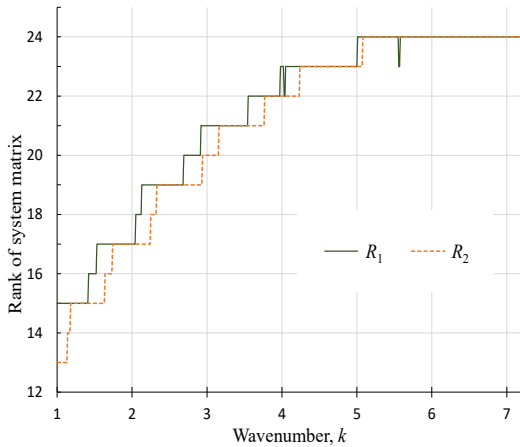


Fig. 11 Ranks of \mathbf{SM} and \mathbf{SM}_{mem} for the arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition for $N=24$

Table 4 Eigenvalues of the arbitrarily shaped cavity with the mixed boundary condition obtained by the proposed method using Eq. (23) and FEM(ANSYS)

	$\lambda^{(1)}$	$\lambda^{(2)}$	$\lambda^{(3)}$	$\lambda^{(4)}$	$\lambda^{(5)}$	$\lambda^{(6)}$
Proposed method ($N=20$)	1.29	3.47	4.01	5.52	6.38	6.71
Proposed method ($N=24$)	1.29	3.50	4.01	5.56	6.36	6.71
ANSYS (1390 nodes)	1.31	3.50	4.03	5.54	6.37	6.72

비교해보면, 오차가 각각 1.53% 와 0.86 %로 적은 오차를 가짐도 확인된다. Fig. 9에서 추출된 모든 고유치들은 Table 4에 요약되었다. 이상과 같이, 제안된 방법은 임의의 형상 음향 공동에 대해서도 전체 주파수 대역에서 모든 고유치를 정확하게 추출할 수 있음이 확인된다.

5. 결 론

강체벽 경계와 개방 경계로 이루어진 혼합 경계를 가진 음향 공동에 NDIF법을 적용하면, 저주파수 고유치가 추출되지 않은 문제점이 이전 연구에서 확인되었다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있는 개선된 NDIF법이 제안되었으며, 엄밀해를 가지는 사각형

음향 공동과 임의의 형상 음향 공동에 제안된 방법을 적용하여 그 정확성과 타당성을 검증하였다. 향후 연구에서는 보다 다양한 혼합 경계 조건과 형상을 가진 음향 공동에 대한 추가적인 예제 검증이 진행될 예정이다.

후 기

이 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원 과제임.

References

- (1) Kang, S. W. and Lee, J. M., 2000, Eigenmode Analysis of Arbitrarily Shaped Two-dimensional Cavities by the Method of Point-matching, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 107, No. 3, pp. 1153~1160.
- (2) Koutromanos, I., 2018, Fundamentals of Finite Element Analysis: Linear Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, United States.
- (3) Tanaka, M. and Du, Q., 2014, Boundary Element Methods: Principles and Applications, Pergamon Press, Oxford, England.
- (4) 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.
- (5) Kang, S. W., 2023, Application of NDIF Method for Overcoming the Problem of Lowering the Eigenvalue Accuracy of Arbitrarily Shaped Acoustic Cavities: Part 1 (theoretical formulation and verification), Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 437~444.
- (6) Blevins, R. D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold Company, NY, United States.



Sang Wook Kang received a B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Dept. of Mechanical Design Engineering from Seoul National University. He is working in Hansung University