

# 오목 형상 음향공동의 전 주파수 대역 고정밀도 고유치 추출을 위한 두 영역 분할법 기반 무차원 동영향 함수법: 제1부(이론 정립과 검증)

## Two-domain Decomposition-based NDIF Method for Full-frequency High-precision Eigenvalue Extraction of Concave Acoustic Cavities: Part I(Theoretical Formulation and Verification)

강 상 욱<sup>†</sup>  
Sang Wook Kang<sup>†</sup>

(Received October 14, 2025 ; Revised October 24, 2025 ; Accepted October 29, 2025)

**Key Words :** NDIF Method(무차원동영향함수법), Concave Acoustic Cavity(오목 음향 공동), Eigenvalue(고유치), Full Frequency(전 주파수 대역), Two-domain Decomposition(두 영역 분할)

### ABSTRACT

This study established the theoretical formulation and validation of a two-domain decomposition-based non-dimensional dynamic influence function (NDIF) method for full-frequency eigenvalue analysis of concave acoustic cavities. In the previously developed two-domain decomposition-based NDIF method, the results became unstable or lower-order modes were lost as the number of boundary nodes increased. Although subsequent approaches enabled full-frequency analysis, they remained confined to convex geometries. To overcome these issues, this study proposed a method that enables stable extraction of all eigenvalues, including lower-order eigenvalues, across the full frequency range for both convex and concave cavities, regardless of node count. The validity of the method was demonstrated by analyzing a rectangular cavity with exact analytical solutions, confirming its accuracy and robustness. A series of example studies on various concave acoustic cavities are presented in Part 2 to further verify the effectiveness of the proposed theory.

### 1. 서 론

음향 공동의 고유치 해석 문제는 건축 음향, 차량 및 항공기 객실 소음 제어, 전자기기 캐비닛 설계 등 다양한 공학적 응용 분야에서 중요한 의미를 갖는다.

이러한 문제를 다루기 위해 유한요소법(FEM)과<sup>(1,2)</sup> 경계요소법(BEM)<sup>(3,4)</sup> 같은 전통적 수치 기법이 널리 활용되어 왔다. 그러나 FEM은 고주파수 해석에서 계산 시간과 메모리 요구량이 급격히 증가하고, BEM은 비대칭 행렬의 처리와 수치적 불안정성 문제를 피하기 어렵다. 이러한 배경에서, 소수의 절점만으로도

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Hansung University, Professor  
E-mail : swkang@hansung.ac.kr

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Chan Jung Kim  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

높은 정밀도의 해를 얻을 수 있는 무차원 동영향 함수법(NDIF법)이 제안되었다<sup>(5)</sup>.

초기 NDIF법은 블록 형상의 음향 공동에 적용되어 우수한 정밀도를 보였으나, 절점 수가 증가하면 고차 고유치의 정밀도는 향상되나 저차 고유치 추출이 불가능한 한계를 지녔다<sup>(5,6)</sup>. 또한 이 방법은 오목 형상에는 적용이 불가능하였다. 이후 제안된 두 영역 분할법 기반 NDIF법은 오목 형상까지 해석이 가능하도록 확장되었지만, 여전히 절점 수가 증가할 경우 시스템 행렬이 발산해서 불안정해지거나 저차 모드가 소실되는 문제가 있었다<sup>(7)</sup>.

최근에는 절점 수와 상관없이 전 주파수 대역에서 고유치를 안정적으로 추출할 수 있는 개선된 NDIF법이 개발되어, 블록 형상에서는 저차 모드까지도 정확히 해석할 수 있음이 입증되었다. 그러나 이 방법은 여전히 블록 형상에 국한되어, 오목 형상 음향 공동의 전 주파수 대역 고유치 해석 문제는 여전히 해결되지 않은 과제로 남아 있다<sup>(8,9)</sup>.

이에 이 연구(제1부)에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 블록 및 오목 형상 모두에서 절점 수와 무관하게 전 주파수 대역의 고유치를 안정적으로 추출할 수 있는 두 영역 분할법 기반 NDIF법의 이론 정립과 검증 수행하였다. 특히 엄밀해가 존재하는 직사각형 음향 공동에 대해 정확한 수치 검증을 실시하여, 제안된 방법의 정밀성과 안정성을 확인하고 이론적 기반을 확립하였다. 이어지는 제2부에서는 이 연구에서 정립된 방법을 V자형 및 L자형 공동과 같은 대표적인 오목 형상에 적용하여 전 주파수 대역 고유치 해석 성능을 검증하고, FEM 결과와의 비교를 통해 제안된 방법의 실질적 타당성과 활용 가능성을 평가한다.

## 2. 기존 두 영역 분할법 기반 NDIF법 이론

과거의 NDIF법은 블록 형상 음향 공동에 대해 높은 정밀도의 고유치 추출 성능을 제공하였으나<sup>(5,6)</sup>, 오목 형상 음향 공동에 대해서는 적용이 불가능한 한계를 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 제안된 방법이 바로 두 영역 분할법 기반 NDIF법이다<sup>(7)</sup>. 이 방법의 핵심은 오목 형상을 복수의 블록 부분 영역으로 나누고, 각 영역에 대해 독립적으로 NDIF법을 적용한 뒤 접경 연속 조건을 통해 전체 시스템 행렬을 구성하는 것이다.

예를 들어 Fig. 1과 같이 오목 공동을 두 개의 볼록 영역  $D_I$ 과  $D_{II}$ 로 분할할 수 있다. 각 영역 내부의 음압 분포는 베셀 함수 기반의 무차원 동영향 함수들의 선형 결합으로 표현되며, 일반적으로 식 (1)과 같이 가정된다<sup>(5)</sup>.

$$p_I(\mathbf{r}^{(j)}) = \sum_{s=1}^{N_I+N_a} A_s J_0(k|\mathbf{r}^{(j)} - \mathbf{r}_s^{(j)}|) \tag{1}$$

여기서,  $J_0(\dots)$ 는 제1종 0차 베셀 함수,  $A_s$ 는 기여도 상수,  $k$ 는 주파수 파라미터,  $N_I$ 는 영역  $D_I$ 의 경계 위의 절점 개수,  $N_a$ 는 두 영역의 접경  $\Gamma_a$  위의 절점 개수를 의미한다. 위치벡터  $\mathbf{r}^{(j)}$ 는 영역 내부의 한 점을, 위치벡터  $\mathbf{r}_s^{(j)}$ 는 경계 상의 s번째 절점을 나타낸다.

각 경계 절점에서는 강제벽 경계 조건이 적용되며, 이는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\frac{\partial p_I(\mathbf{r}_i^{(j)})}{\partial n_i^{(j)}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_I \tag{2}$$

여기서,  $\mathbf{r}_i^{(j)}$ 는 i번째 경계 절점에 대한 위치벡터,  $n_i^{(j)}$ 는 i번째 경계 절점에서의 법선 방향이다. 식 (1)을 식 (2)에 대입하면, 경계 조건을 만족하는 선형 방정식들이 도출되며, 이를 정리하면 식 (3)과 같은 행렬식 형태를 얻는다.

$$\mathbf{VM}_{11}\mathbf{A}_1 + \mathbf{VM}_{1a}\mathbf{A}_a = \mathbf{0} \tag{3}$$

식 (3)에서 수행한 식 (1)~식 (3)의 절차를 영역  $D_{II}$ 에 대해 동일하게 수행하면 식 (4)와 같은 행렬식이 얻어진다.

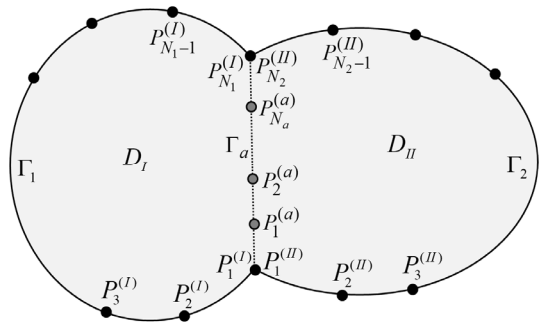


Fig. 1 Concave acoustic cavity partitioned into two convex subdomains  $D_I$  and  $D_{II}$  by the interface  $\Gamma_a$

$$\mathbf{VM}_{22}\mathbf{B}_2 + \mathbf{VM}_{2a}\mathbf{B}_a = 0 \tag{4}$$

식 (4)와 같이 각 영역에서 독립적으로 시스템 행렬이 구성되며, 다음으로 두 영역의 접경  $\Gamma_a$ 에서 음압과 법선 방향 음압 기울기의 연속 조건을 고려하면 식 (5), 식 (6)과 같은 두 개의 행렬식을 각각 얻을 수 있다.

$$\mathbf{UM}_{a1}\mathbf{A}_1 + \mathbf{UM}_{aa}\mathbf{A}_a = \mathbf{UM}_{a2}\mathbf{B}_2 + \mathbf{UM}_{aa}\mathbf{B}_a \tag{5}$$

$$\mathbf{VM}_{a1}\mathbf{A}_1 + \mathbf{VM}_{aa}\mathbf{A}_a = \mathbf{VM}_{a2}\mathbf{B}_2 + \mathbf{VM}_{aa}\mathbf{B}_a \tag{6}$$

앞에서 구한 4개의 행렬식 식 (3)~식 (6)을 통합하면 식 (7)과 같은 1개의 최종 시스템 행렬식을 얻는다.

$$\mathbf{SM}(k)\mathbf{C} = 0 \tag{7}$$

여기서,  $\mathbf{SM}(k)$ 는 주파수 파라미터  $k$ 에 종속되는 최종 축약 시스템 행렬로 식 (8)에 의해 주어지며,  $\mathbf{C}$ 는 최종 기여도 벡터로 고유 모드 형상을 추출할 때 사용된다.

$$\mathbf{SM} = \begin{bmatrix} \mathbf{UM}_{aa} - \mathbf{UM}_{a1}\mathbf{VM}_{11}^{-1}\mathbf{VM}_{1a} & \mathbf{UM}_{a2}\mathbf{VM}_{22}^{-1}\mathbf{VM}_{2a} - \mathbf{UM}_{aa} \\ \mathbf{VM}_{aa} - \mathbf{VM}_{a1}\mathbf{VM}_{11}^{-1}\mathbf{VM}_{1a} & \mathbf{VM}_{a2}\mathbf{VM}_{22}^{-1}\mathbf{VM}_{2a} - \mathbf{VM}_{aa} \end{bmatrix} \tag{8}$$

마지막으로, 해석 대상 음향 공동의 고유치는 최종 축약 시스템 행렬의 판별식이 0이 되는 조건 식 (9)로부터 구할 수 있다.

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

식 (9)와 같이 두 영역 분할법 기반 NDIF법은 오목 형상 음향 공동을 해석할 수 있도록 기존 NDIF법을 확장한 방식이다. 비록 절점 수가 증가할 경우 여전히 수치 불안정성과 저차 모드 소실 문제가 발생하는 한계가 있으나, 오목 형상까지 이론적으로 적용 가능성을 넓혔다는 점에서 중요한 전환점을 마련하였다.

### 3. 전 주파수 대역 고유치 추출 방안

#### 3.1 저차 고유치 소실 문제 분석

볼록 형상 음향 공동을 다룬 기존 무차원동영향함

수법(NDIF법) 연구에서, 절점 수가 증가함에 따라 저차 고유치가 누락되는 현상이 보고되었다<sup>(1,5,6)</sup>. 이 연구에서는 이러한 현상이 두 영역 분할법 기반 NDIF법에서도 동일하게 발생하는지 확인하고, 그 원인을 규명하고자 한다. 이를 위해 해석 대상은 엄밀해를 가진 강체벽 경계 직사각형 음향 공동(가로 1.2 m, 세로 0.9 m)으로 설정하고, 분할 영역법을 적용하기 위해 Fig. 2와 같이 두 개의 영역  $D_I$ 와  $D_{II}$ 로 의도적으로 분할하였다.

Fig. 2(a)는 외곽 경계에 20개의 절점을, 접경 경계에 3개의 절점을 배치하여 총 23개 절점으로 이산화한 경우를 나타내며, Fig. 2(b)는 외곽 경계에 28개의 절점과 접경 경계에 4개의 절점을 배치하여 총 32개 절점으로 이산화한 경우이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 두 음향 공동에 대해 기존 NDIF

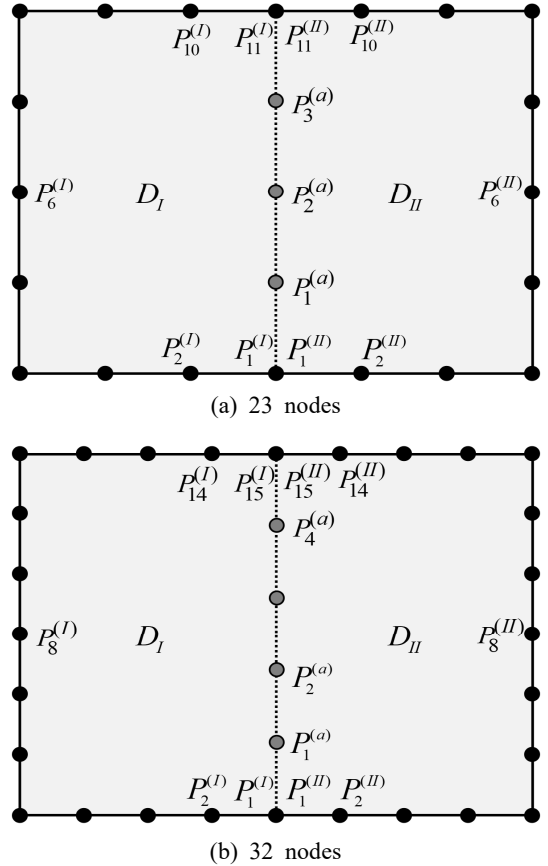


Fig. 2 Rectangular acoustic cavities partitioned into two subdomains and discretized with 23 nodes and 32 nodes

법 식 (9)의 판별식을 이용하여 추출한 판별식 곡선들을 보여준다. 24개 절점을 사용한 경우(Fig. 2(a))에 해당되는 실선 판별식 곡선을 살펴보면 전체 주파수 영역에서 총 8개의 1차~8차 고유치가 안정적으로 구해졌음을 확인할 수 있다. 반면에 절점 수를 증가시킨 32개 절점을 사용한 경우(Fig. 2(b))인 점선 판별식 곡선을 살펴 보면, 저주파수 영역에서 시스템 행렬이 발산해서 1차~3차 저차 고유치가 추출되지 못하였고 단지 4차~8차 고차 고유치만 추출되었음이 확인된다.

Fig. 3의 판별식 곡선에서 추출된 고유치들은 Table 1에 요약되었다. Table 1의 두 번째와 세 번째 열의 고

유치들은 기존 NDIF법에서 23개와 32개의 절점을 각각 사용한 경우에 대한 고유치들이다. 그리고 세번째와 네번째 열의 고유치들은 각각 엄밀해와 FEM(ANSYS)에 의해 계산된 고유치이다. 23개 절점을 사용한 기존 NDIF법 고유치를 엄밀해 고유치와 비교해보면, 1차~5차 저차 고유치들은 엄밀해와 오차가 없으나 6차~8차 고차 고유치들은 엄밀해 고유치와 오차가 있음이 확인된다<sup>(10)</sup>. 그래서 절점 수를 늘여서 32개 절점을 사용한 경우를 엄밀해와 비교해보면, 6차~8차 고유치들은 절점 수를 늘인 덕분에 엄밀해에 수렴했음이 확인되나 1차~3차 고유치들은 소실되는 문제점이 발생했다. 참고로 FEM 고유치들은 기존 NDIF법 고유치들에 비해 상대적으로 엄밀해에 대해 더 큰 오차를 가짐도 확인된다. 이러한 사실은 적은 개수의 절점을 사용함에도 FEM에 비해 훨씬 정확한 결과를 제공하는 NDIF법의 기본 특성이자 장점에 해당한다.

### 3.2 저차 고유치 소실 문제 해결 방안

Fig. 3의 점선으로 표시된 판별식 곡선에서 주파수 파라미터가 5보다 작은 영역에서 저차 고유치가 추출되지 않는 현상은, 절점 수의 증가로 인해 저주파수 영역에서 시스템 행렬이 발산하는 데 기인하는 것으로 판단된다. 이는 기저함수들이 선형 독립성을 잃으면서 발생하며, 결과적으로 판별식 값이 왜곡되어 계산된다. 이러한 문제를 해소하고 판별식 값을 정확히 평가하기 위해서, 먼저 오목 멤브레인에 대한 이전

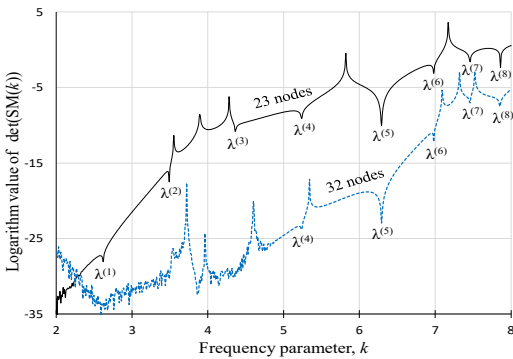


Fig. 3 Determinant curves for the rectangular cavities (23 nodes and 32 nodes), obtained using Eq. (9) of the previous NDIF method

Table 1 Eigenvalues of the rectangular cavity obtained by the previous NDIF method using Eq. (9), the exact solution and FEM (ANSYS). The values in parentheses indicate the errors [%] relative to the exact solution

	Previous NDIF method		Exact solution	FEM (2500 nodes)
	23 nodes	32 nodes		
$\lambda^{(1)}$	2.618 (0.00)	None	2.618	2.618 (0.00)
$\lambda^{(2)}$	3.491 (0.00)	None	3.491	3.492 (0.03)
$\lambda^{(3)}$	4.363 (0.00)	None	4.363	4.364 (0.02)
$\lambda^{(4)}$	5.236 (0.00)	5.236 (0.00)	5.236	5.238 (0.04)
$\lambda^{(5)}$	6.293 (0.00)	6.293 (0.00)	6.293	6.295 (0.03)
$\lambda^{(6)}$	6.978 (-0.04)	6.981 (0.00)	6.981	6.989 (0.11)
$\lambda^{(7)}$	7.457 (0.01)	7.456 (0.00)	7.456	7.463 (0.09)
$\lambda^{(8)}$	7.860 (0.08)	7.854 (0.00)	7.854	7.862 (0.10)

연구 결과를 확장하여 시스템 행렬의 랭크(rank)를 활용한 새로운 계산법 식 (10)이 제안된다<sup>(11,12)</sup>.

$$\det(\mathbf{SM}(k)) = \prod_{i=1}^{R(k)} \Omega_i(k) \tag{10}$$

여기서,  $R(k)$ 는 축약 시스템 행렬  $\mathbf{SM}(k)$ 의 랭크,  $\Omega_i(k)$ 는 축약 시스템 행렬에 대한 대수 고유치 문제 식 (11)에서의  $i$ 번째 고유치를 의미한다<sup>(11)</sup>.

$$\mathbf{SM}(k)\mathbf{v}_i = \Omega_i(k)\mathbf{v}_i \tag{11}$$

여기서,  $\mathbf{v}_i$ 는  $i$ 번째 고유 벡터를 의미한다.

이전 연구에서 설명한 바와 같이, 관심 주파수 영역에서 시스템 행렬의 랭크가 시스템 행렬의 크기보다 작아야만 식 (10)이 유용성을 가진다는 것이다<sup>(11)</sup>. 그래서 Fig. 2(b)의 32개 절점을 사용한 경우에 대한 축약 시스템 행렬(식 (8))의 랭크를 관심 주파수 영역에서 구해본 결과, 모든 영역에서 8인 것으로 확인되며 이 값은 시스템 행렬의 크기와 정확히 일치한다. 결과적으로 식 (10)을 사용하여 판별식 곡선을 그려 보면 식 (9)를 사용한 Fig. 3의 점선 판별식 곡선과 같게 되는 무의미한 결과가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이전 오목 멤브레인 연구<sup>(11)</sup>에서 시스템 행렬을 축약 없이 구하는 방안을 제안하였으며, 이 연구 결과를 이 연구에 확장하고자 한다.

식 (3)~식 (6)의 행렬식들에 포함된 미지 기여도 벡터들을 소거하지 않고 식 (12)와 같이 하나의 행렬식을 구성할 수 있다.

$$\mathbf{GM}(k)\mathbf{D} = \mathbf{0} \tag{12}$$

여기서, 비축약 시스템 행렬  $\mathbf{GM}(k)$ 와 미지 기여도 벡터  $\mathbf{D}$ 는 식 (13), 식 (14)와 같다.

$$\mathbf{GM} = \begin{bmatrix} \mathbf{VM}_{11} & \mathbf{VM}_{1a} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{VM}_{22} & \mathbf{VM}_{2a} \\ \mathbf{UM}_{a1} & \mathbf{UM}_{aa} & -\mathbf{UM}_{a2} & -\mathbf{UM}_{aa} \\ \mathbf{VM}_{a1} & \mathbf{VM}_{aa} & -\mathbf{VM}_{a2} & -\mathbf{VM}_{aa} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\mathbf{D} = \{\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_a \quad \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{B}_a\}^T \tag{14}$$

이제 식 (13)의 비축약 시스템 행렬을 식 (10)에 대입 하면 식 (15)와 같은 판별식 계산법 식을 얻을 수 있다.

$$\det(\mathbf{GM}(k)) = \prod_{i=1}^{R_g(k)} \Omega_i^{(g)}(k) \tag{15}$$

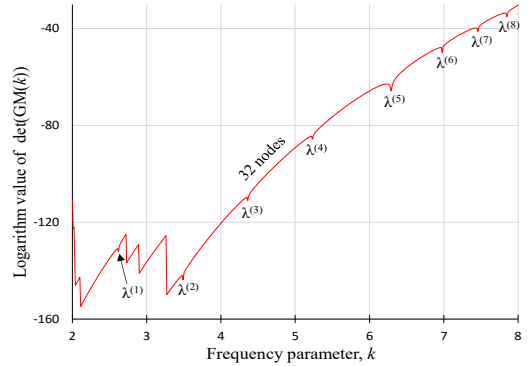


Fig. 4 Determinant curve of the 32-node rectangular cavity, obtained using Eq. (15) of the proposed method

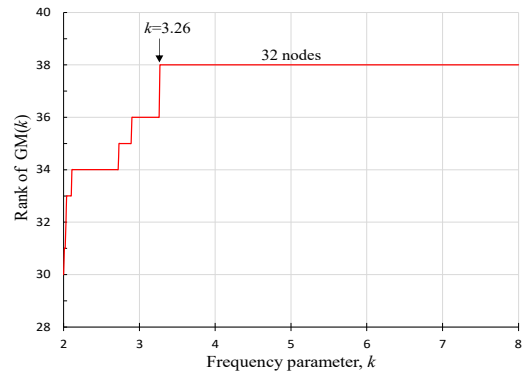
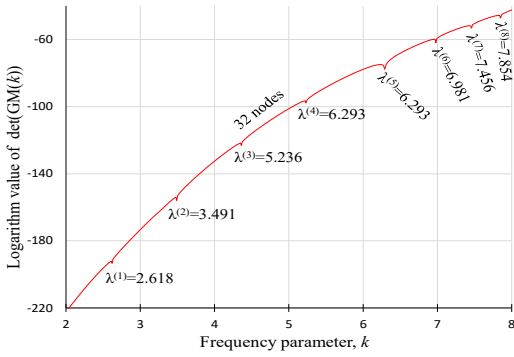


Fig. 5 Rank function  $R_g(k)$  of the system matrix  $\mathbf{GM}(k)$  of the rectangular cavity for 32 nodes

여기서,  $R_g(k)$ 는 비축약 시스템 행렬  $\mathbf{GM}(k)$ 의 랭크,  $\Omega_i^{(g)}(k)$ 는 비축약 시스템 행렬에 대한 대수 고유치 문제에서의  $i$ 번째 고유치를 의미한다.

새로이 정립된 식 (15)를 이용하여 Fig. 2(b)의 32개 절점을 사용한 경우에 대해 판별식 곡선을 그리면 Fig. 4와 같다. 이때  $\mathbf{GM}(k)$ 의 랭크  $R_g(k)$ 는 Fig. 5에서와 같이 주파수 파라미터가 3.26보다 작은 저주파수 영역에서 비축약 시스템 행렬의 크기 38보다 작은 값을 가짐이 확인된다. 이러한 이유로 Fig. 4의 판별식 곡선에서 주파수 파라미터가 3.26보다 작은 저주파수 영역에서 판별식 값이 불연속성을 가지게 된다.

Fig. 4에서와 같이, 판별식 곡선에서 관찰되는 불연속 현상은 시스템 행렬의 랭크 변화와 밀접하게 연관되어 있으며, 이는 판별식 곡선으로부터 고유치의 위



**Fig. 6** Determinant curve of the 32-node rectangular cavity, obtained using Eq. (16) of the proposed method

치를 파악하는데에 어려움을 야기한다. 이 연구에서는 이전의 멤브레인 연구에서 제안된 불연속성 제거 판별식 보정 계산 방법인 식 (16)을 음향 공동에 확장 적용하였다.

$$\det(\mathbf{GM}(k)) = \prod_{i=1}^{R_s(k)} \Omega_i^{(g)}(k) \div \prod \Omega_{\text{add}}(k) \quad (16)$$

여기서,  $\prod \Omega_{\text{add}}(k)$ 은 비축약 시스템 행렬  $\mathbf{GM}(k)$ 의 랭크 변화에 의해 추가적으로 곱해지는 고유치들의 곱이며, 이에 대한 보다 자세한 설명은 이전 연구를 참고하면 된다<sup>(8,11)</sup>. 식 (16)을 이용하여 얻은 판별식 곡선은 Fig. 6에 도시되어 있다. 이 결과는 Fig. 4에서 나타났던 불연속성이 제안된 보정식 식 (16)을 통해 효과적으로 제거되었음을 보여준다. 또한, 보정 후의 고유치 값들은 Fig. 6의 판별식 곡선에 직접 표기하였으며, 이들 값들은 Table 1의 엄밀해와 정확히 일치함이 확인되었다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 기존 NDIF법이 가진 한계를 극복하기 위하여, 볼록 및 오목 형상 음향 공동 모두에서 절점 수와 무관하게 전 주파수 대역 고유치를 안정적으로 추출할 수 있는 두 영역 분할법 기반 NDIF법의 이론 정립과 검증을 수행하였다. 제안된 방법은 직사각형 공동과 같이 엄밀해가 존재하는 형상을 대상으로 정확한 수치 검증을 실시함으로써, 기존 기법 대비 높은 정밀성과 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

이번 결과는 제안된 NDIF법이 오목 형상 음향 공동에서도 안정적으로 적용 가능하며, 기존 연구에서 제기된 불안정성과 저차 모드 소실 문제를 근본적으로 개선할 수 있음을 명확히 입증하였다. 더 나아가, 이 연구는 단순 형상에 대한 검증을 넘어, 향후 V자형·L자형과 같은 오목 형상은 물론 복잡한 경계 형상을 지닌 음향 공동으로의 적용 가능성을 뒷받침하는 이론적 기반을 마련하였다. 이어지는 제 2부에서는 제안된 방법을 V자형 및 L자형 공동과 같은 대표적인 오목 형상 음향 공동에 적용하여, FEM과의 비교를 통해 실질적인 타당성과 활용 가능성을 평가한다.

#### 후 기

이 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원 과제임.

#### References

- (1) Bathe, K., 1982, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-hall, NJ, United States.
- (2) Koutromanos, L., 2018, Fundamentals of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, NJ, United States.
- (3) Beskos, D., 1996, Boundary Element Advances in Solid Mechanics, Springer-verlag, NY, United States.
- (4) Tanaka, M., 2014, Boundary Element Methods (Principles and Applications), Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.
- (5) Kang, S. W. and Lee, J. M., 2000, Eigenmode Analysis of Arbitrarily Shaped Two-dimensional Cavities by the Method of Point-matching, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 107, No. 3, pp. 1153~1160.
- (6) 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 Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 960~966.
- (7) 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.

(8) 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 Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 437~444.

(9) Kang, S. W., 2023, Application of NDIF Method for Overcoming the Problem of Lowering the Eigenvalue Accuracy of Arbitrarily-shaped Acoustic Cavities: Part 2 (Example Studies and Consideration), Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 618~626.

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

NY, United States.

(11) Kang, S. W., 2024, Development of the NDIF Method Based on the Sub-domain Method to Overcome the Non-extraction Problem of Low-order Eigenvalues for Concave Membranes: Part 1(Theoretical Formulation and Verification), Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 34, No. 6, pp. 709~716.

(12) Kang, S. W., 2024, Development of the NDIF Method Based on the Sub-domain Method to Overcome the Non-extraction Problem of Low-order Eigenvalues for Concave Membranes: Part 2(Example Studies and Considerations), Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 34, No. 6, pp. 728~734.