

개선된 영역분할법 기반 무차원동영향함수법을 이용한 구멍이 있는 멤브레인의 전 주파수 대역 고유치 추출: 제1부(이론 정립과 검증)

Full-frequency Eigenvalue Extraction of Membranes with an Internal Hole using an Improved Domain-decomposition-based NDIF Method: Part 1 (Theoretical Formulation and Verification)

강 상 옥[†]
Sang Wook Kang[†]

(Received May 12, 2026 ; Revised June 2, 2026 ; Accepted June 5, 2026)

Key Words : NDIF Method(무차원동영향함수법), Membrane with an Internal Hole(구멍이 있는 멤브레인), Domain Decomposition Method(영역분할법), Eigenvalue Analysis(고유치 해석), Full-frequency Eigenvalue Extraction(전 주파수 대역 고유치 추출)

ABSTRACT

In this study, a significant limitation of the conventional domain-decomposition-based nondimensional dynamic influence function (NDIF) method is addressed. The final system matrix is formulated to be constructed systematically, eliminating the inefficient requirement of re-deriving the entire matrix whenever the number of subdomains changes. This improved formulation is applied to a membrane with an internal hole to investigate whether the lower-order eigenvalue loss problem, which typically occurs as the number of boundary nodes increases, persists in such a configuration. A numerical example is considered to verify the effectiveness, stability, and accuracy of the proposed method. The numerical results demonstrate that the lower-order eigenvalue loss problem indeed occurs in membranes with an internal hole when using the conventional method. However, the improved NDIF method successfully resolves this problem, providing stable and accurate eigenvalue extraction over the entire frequency range regardless of the number of boundary nodes.

1. 서 론

멤브레인의 고유치 해석은 구조진동 및 관련 공학 분야에서 중요한 연구 주제이며, 형상이 복잡해질수록 이를 효율적이고 정밀하게 수행할 수 있는 해석 기법의 필요성이 더욱 커진다. 특히 오목 형상 또는

구멍이 있는 멤브레인과 같이 단순 블록 형상으로 다룰 수 없는 구조물의 경우에는, 기존 수치해석 기법만으로 고정밀도 해석을 수행하는 데 한계가 있을 수 있다^(1,2). 이러한 점에서 저자가 처음 개발한 무차원동영향함수법(NDIF법)은 비교적 적은 수의 경계 절점 만으로도 높은 정확도의 고유치 해석이 가능한 방법으로서 주목받아 왔다⁽³⁾.

[†] 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

연구자는 이전 연구에서 기존 NDIF법 이론을 발전시켜, 영역분할법을 도입함으로써 오목 멤브레인과 구멍이 있는 멤브레인에도 적용 가능한 NDIF법을 개발한 바 있다⁽⁴⁾. 특히 영역분할법 기반 NDIF법은 복잡한 형상을 여러 개의 블록 영역으로 분할한 뒤, 분할된 영역 사이의 접경 조건을 이용하여 전체 시스템 행렬을 구성함으로써 기존 NDIF법의 적용 범위를 크게 확장하였다는 점에서 중요한 의의를 가진다. 그러나 기존 분할법 기반 NDIF 이론에서는 경계 절점 수가 증가할수록 시스템 행렬의 수치적 안정성이 저하되고⁽⁴⁾, 그 결과 저주파수 영역에서 일부 저차 고유치가 추출되지 않는 문제가 발생하는 것이 확인되었다. 또한 기존 영역분할법 기반 NDIF법은 분할 영역의 개수가 달라질 때마다 그에 대응하는 최종 시스템 행렬식을 새로 유도해야 하는 불편함이 있어, 보다 일반적이고 체계적인 정식화가 요구된다.

이와 같은 노드 수 증가에 따른 저차 고유치 소실 문제를 해결하기 위하여, 최근의 저차 연구에서는 영역분할법 기반 NDIF법을 이용한 오목 멤브레인의 고유치 해석에서 개선된 NDIF법이 제안되었다^(5,6). 이 방법은 시스템 행렬의 구성 및 판별식 계산 절차를 개선함으로써, 노드 수와 상관없이 전 주파수 대역에서 저차 및 고차 고유치를 안정적으로 추출할 수 있도록 한 것이 핵심이다. 또한 여러 수치 예제와 기준해 또는 FEM 결과와의 비교를 통하여, 제안된 방법의 타당성과 정확성이 검증되었다.

그러나 이와 같은 최근의 개선된 NDIF법의 타당성과 정확성은 아직 구멍이 있는 멤브레인에 대해서는 충분히 검토되지 않았다. 구멍이 있는 멤브레인은 내부 경계를 포함하는 보다 복잡한 형상으로서, 영역분할법 기반 NDIF법을 적용할 경우 오목 멤브레인과는 다른 수치적 거동을 나타낼 가능성이 있다. 따라서 오목 멤브레인에서 관찰된 저차 고유치 소실 문제가 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 유사하게 발생하는지를 확인할 필요가 있으며, 아울러 오목 멤브레인에 대해 제안된 개선된 NDIF법이 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 유효한지를 검토할 필요가 있다. 더 나아가, 분할 영역 수의 변화에 따라 최종 시스템 행렬식을 반복적으로 새로 유도해야 하는 기존 방법의 단점 역시 함께 개선할 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 구멍이 있는 멤브레인에 영역분할법 기반 NDIF법을 적용하였을 때, 노드 수 증

가에 따라 저차 고유치 소실 문제가 발생하는지를 검토하고자 한다. 아울러 오목 멤브레인에 대해 최근 제안된 개선된 NDIF법이 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 유효한지를 확인하고, 이를 통하여 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 저차 고유치 소실 문제를 해결하고자 한다. 또한 기존 영역분할법 기반 NDIF법에서 분할 영역 수에 따라 최종 시스템 행렬식을 새로 유도해야 하는 단점을 개선함으로써, 보다 일반적이고 체계적인 시스템 행렬 정식화를 제시하고자 한다. 이를 위하여 예제 문제에 대한 수치 검증을 수행하고, 기준해 또는 수치해석 결과와의 비교를 통하여 제안된 방법의 타당성과 정확성을 검토하고자 한다.

2. 구멍이 있는 멤브레인에 대한 NDIF법

내부에 구멍이 있는 멤브레인에 대한 고유치 해석을 위해, 분할 영역의 개수와 무관하게 적용 가능한 영역분할법 기반 NDIF법이 이 연구에서 정식화된다. 내부에 구멍이 있는 멤브레인에 대한 고유치 해석을 위해서 Fig. 1과 같이 전체 영역을 S 개의 부분 영역 $D_1, D_2, \dots, D_S$ 로 분할한다. 각각의 부분 영역은 고정 경계(fixed boundary)와 이웃 부분 영역과의 접경(interface)에 의해 둘러싸여 있다. 예를 들면, i 번째 부분 영역 D_i 는 고정 경계 Γ_i 및 접경 $\Gamma_{(i-1)}$ 과 $\Gamma_{(i)}$ 로 둘러싸여 있다. 여기서 아래 첨자에 포함된 괄호의 의미는 접경을 의미한다.

저자의 이전 연구 결과를 응용 확장하면⁽⁴⁾, i 번째 부분 영역 D_i 에 대한 로컬 시스템 행렬식은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{SM}_{ii} & \mathbf{SM}_{i(i-1)} & \mathbf{SM}_{i(i)} \\ \mathbf{SM}_{(i-1)i} & \mathbf{SM}_{(i-1)(i-1)} & \mathbf{SM}_{(i-1)(i)} \\ \mathbf{SM}_{(i)i} & \mathbf{SM}_{(i)(i-1)} & \mathbf{SM}_{(i)(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i^i \\ \mathbf{A}_{(i-1)}^i \\ \mathbf{A}_{(i)}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{U}_{(i-1)} \\ \mathbf{U}_{(i)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, S-1, S$

여기서, 벡터 $\mathbf{A}_i^i, \mathbf{A}_{(i-1)}^i, \mathbf{A}_{(i)}^i$ 는 기여도 벡터를 의미하며, 여기서 위 첨자 i 는 부분 영역 D_i 를 나타내며 아래 첨자 $i, (i-1), (i)$ 는 각각 D_i 를 둘러싸고 있는 경계 Γ_i , 접경 $\Gamma_{(i-1)}$ 과 $\Gamma_{(i)}$ 를 나타낸다. 그리고 $\mathbf{U}_{(i-1)}$ 와 $\mathbf{U}_{(i)}$ 는 각각 접경 $\Gamma_{(i-1)}$ 과 $\Gamma_{(i)}$ 에서의 변위를 나타내며, 시스템 행렬 $\mathbf{SM}_{\alpha\beta}$ 의 p 행 q 열 성분 $\mathbf{SM}_{\alpha\beta}(p, q)$ 은 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{SM}_{\alpha\beta}(p, q) = J_0(\wedge |\mathbf{r}_p^\alpha - \mathbf{r}_q^\beta|) \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{r}_p^\alpha$ 는 경계(또는 접경) Γ_α 에 놓인 p 번째 노드에 대한 위치벡터를 의미한다.

다음으로, i 번째 접경 $\Gamma_{(i)}$ 에서 변위와 기울기 연속 조건을 고려하면 식 (3), 식 (4)와 같은 로컬 시스템 행렬식들을 각각 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \mathbf{SM}_{(i)i} \mathbf{A}_i^i + \mathbf{SM}_{(i)(i-1)} \mathbf{A}_{(i-1)}^i + \mathbf{SM}_{(i)(i)} \mathbf{A}_i^i \\ &= \mathbf{SM}_{(i)i+1} \mathbf{A}_{i+1}^{i+1} + \mathbf{SM}_{(i)(i)} \mathbf{A}_i^{i+1} + \mathbf{SM}_{(i)(i+1)} \mathbf{A}_{i+1}^{i+1} \\ & i = 1, 2, \dots, S-1, S \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{VM}_{(i)i} \mathbf{A}_i^i + \mathbf{VM}_{(i)(i-1)} \mathbf{A}_{(i-1)}^i + \mathbf{VM}_{(i)(i)} \mathbf{A}_i^i \\ &= \mathbf{VM}_{(i)i+1} \mathbf{A}_{i+1}^{i+1} + \mathbf{VM}_{(i)(i)} \mathbf{A}_i^{i+1} + \mathbf{VM}_{(i)(i+1)} \mathbf{A}_{i+1}^{i+1} \\ & i = 1, 2, \dots, S-1, S \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{VM}_{\alpha\beta}$ 는 $\mathbf{SM}_{\alpha\beta}$ 를 경계(또는 접경)의 법선 방향으로 미분한 값으로, $\mathbf{VM}_{\alpha\beta}$ 의 p 행, q 열 성분 $\mathbf{VM}_{\alpha\beta}(p, q)$ 은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{VM}_{\alpha\beta}(p, q) = \partial J_0(\wedge |\mathbf{r}_p^\alpha - \mathbf{r}_q^\beta|) / \partial n \quad (5)$$

여기서, n 은 경계(또는 접경)의 법선 방향을 의미한다.

이제 식 (1), 식 (3), 식 (4)로 주어진 3S개의 로컬 시스템 행렬식을 하나의 행렬식으로 나타내면 식 (6)과 같은 글로벌 시스템 행렬 $\mathbf{GM}(\wedge)$ 이 포함된 글로벌 시스템 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{GM}(\wedge) \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (6)$$

여기서, $\wedge$ 는 주파수 파라미터이며 글로벌 시스템 행렬 $\mathbf{GM}(\wedge)$ 과 글로벌 기여도 벡터 $\mathbf{B}$ 는 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{GM}(\wedge) = \begin{bmatrix} \mathbf{GM}_{11} & \mathbf{GM}_{12} \\ \mathbf{GM}_{21} & \mathbf{GM}_{22} \\ \mathbf{GM}_{31} & \mathbf{GM}_{32} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_S, \mathbf{A}_{(S)}^1, \mathbf{A}_{(1)}^1, \mathbf{A}_{(1)}^2, \mathbf{A}_{(2)}^2, \dots, \mathbf{A}_{(S-1)}^S, \mathbf{A}_{(S)}^S\}^T \quad (8)$$

식 (7)에서 $\mathbf{GM}(\wedge)$ 의 부분 행렬 $\mathbf{GM}_{ij}$ 는 식 (9)~식 (14)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{GM}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{SM}_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{SM}_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{SM}_{SS} \end{bmatrix} \quad (9)$$

마지막으로, 해석 대상 멤브레인의 고유치는 이 논문에서 새로이 유도한 글로벌 시스템 행렬(식 (7))의 관별식이 0이 되는 조건 식 (15)로부터 구할 수 있다.

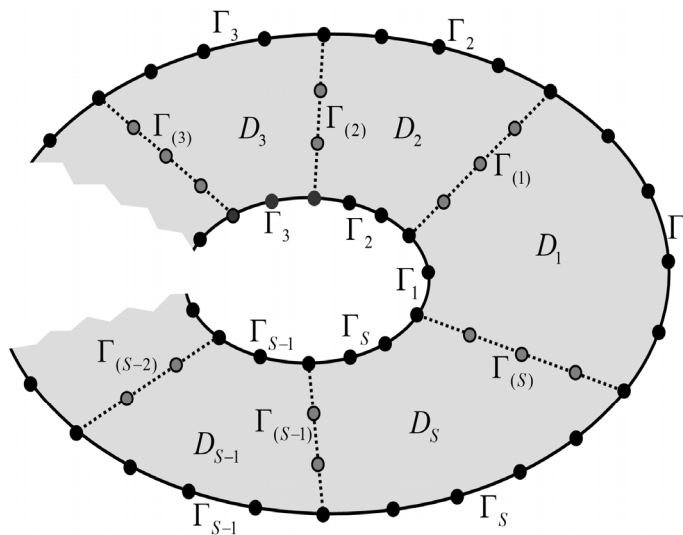


Fig. 1 Perforated membrane divided into S subdomains

$$\mathbf{GM}_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{SM}_{1(S)} & \mathbf{SM}_{1(1)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{SM}_{2(1)} & \mathbf{SM}_{2(2)} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{SM}_{S(S-1)} & \mathbf{SM}_{S(S)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{GM}_{21} = \begin{bmatrix} \mathbf{SM}_{(1)1} & -\mathbf{SM}_{1(2)} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{SM}_{(2)(2)} & -\mathbf{SM}_{(2)3} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{SM}_{(S)1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{SM}_{(S)S} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{GM}_{22} = \begin{bmatrix} \mathbf{SM}_{(1)(S)} & \mathbf{SM}_{(1)(1)} & -\mathbf{SM}_{(1)(1)} & -\mathbf{SM}_{(1)(2)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{SM}_{(2)(1)} & \mathbf{SM}_{(2)(2)} & -\mathbf{SM}_{(2)(2)} & -\mathbf{SM}_{(2)(3)} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{SM}_{(S)(S)} & -\mathbf{SM}_{(S)(1)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{SM}_{(S)(S-1)} & \mathbf{SM}_{(S)(S)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{GM}_{31} = \begin{bmatrix} \mathbf{VM}_{(1)1} & -\mathbf{VM}_{1(2)} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{VM}_{(2)(2)} & -\mathbf{VM}_{(2)3} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{VM}_{(S)1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{VM}_{(S)S} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{GM}_{32} = \begin{bmatrix} \mathbf{VM}_{(1)(S)} & \mathbf{VM}_{(1)(1)} & -\mathbf{VM}_{(1)(1)} & -\mathbf{VM}_{(1)(2)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{VM}_{(2)(1)} & \mathbf{VM}_{(2)(2)} & -\mathbf{VM}_{(2)(2)} & -\mathbf{VM}_{(2)(3)} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{VM}_{(S)(S)} & -\mathbf{VM}_{(S)(1)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{VM}_{(S)(S-1)} & \mathbf{VM}_{(S)(S)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\det(\mathbf{GM}(\wedge)) = 0 \quad (15)$$

3. 제안된 정식 검증

2절에서 새로이 유도한 글로벌 시스템 행렬 식 (7)의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 2와 같은 내부에 정사각 구멍(대각선 길이 0.6 m)이 있는 정사각 멤브레인(변 길이 2 m)이 고려된다. 이 멤브레인을 4개의 부분 영역으로 분할한 후에 64개(Fig. 2(a))와 84개(Fig. 2(b))의 노드로 각각 분할한다.

먼저 식 (7)을 이용하여 64개 노드로 분할한 멤브레인의 글로벌 시스템 행렬을 구한 후에, 일반적인 판별식 계산법 식 (16)을 사용하여 로그 스케일 판별식 곡선을 그리면 Fig. 3의 실선 곡선과 같다.

$$\log(\det(\mathbf{GM}(\wedge))) = 0 \quad (16)$$

Fig. 3의 실선 곡선을 살펴보면 총 10개의 고유치 ($\wedge_1 \sim \wedge_{10}$)가 추출되었음을 확인할 수 있다. 이 고유치들은 Table 1의 두 번째 열에 제시되었으며, 네 번

째 열의 FEM 고유치들과 거의 일치함도 확인된다.

다음으로, Fig. 2(b)와 같이 노드 수를 64개에서 84개로 증가시켜서 식 (16)을 적용하면 Fig. 3의 점선 판별식 곡선을 얻을 수 있다. 이 점선 판별식 곡선을 살펴보면, 저차 고유치 $\wedge_1 \sim \wedge_4$ 가 소실되고 고차 고유치 $\wedge_5 \sim \wedge_{10}$ 만 추출됨이 확인되며 추출된 고유치들은 Table 1의 세 번째 열에 요약하였다. 노드 증가시 발생하는 이러한 저차 고유치 소실은 저주파수 구간에서 시스템 행렬의 랭크가 풀랭크(full rank)가 아니기 때문에 발생한다⁽⁷⁾. 그래서 랭크 추종 판별식 계산 방식인 식 (17)을 적용하여 로그 스케일 판별식 곡선을 얻고자 한다.

$$\log\left(\prod_{k=1}^{R(\wedge)} \gamma_k(\wedge)\right) \quad (17)$$

여기서, $R(\wedge)$ 은 $\mathbf{GM}(\wedge)$ 에 대한 랭크 함수, $\gamma_k(\wedge)$ 는 $\mathbf{GM}(\wedge)$ 에 대한 대수 고유치 문제에서의 k 번째 고유치를 의미한다⁽⁷⁾.

식 (17)을 사용하기 위해 84노드 이산 모델의 $\mathbf{GM}(\wedge)$ 에 대한 랭크 함수 $R(\wedge)$ 을 Fig. 4와 같이

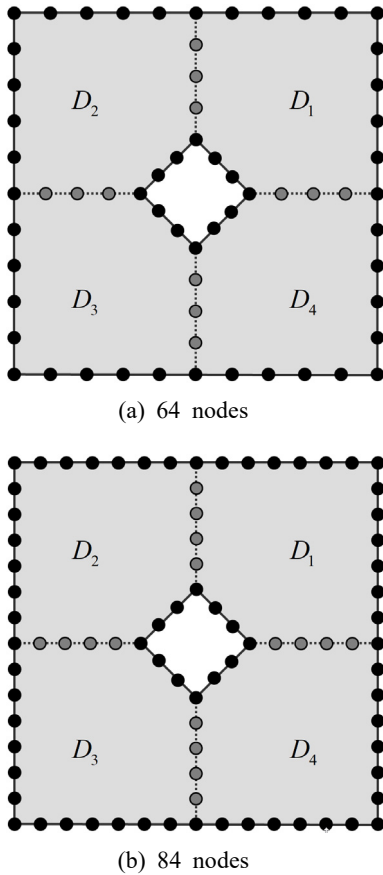


Fig. 2 Perforated membranes divided into four domains and discretized with 64 and 84 nodes, respectively

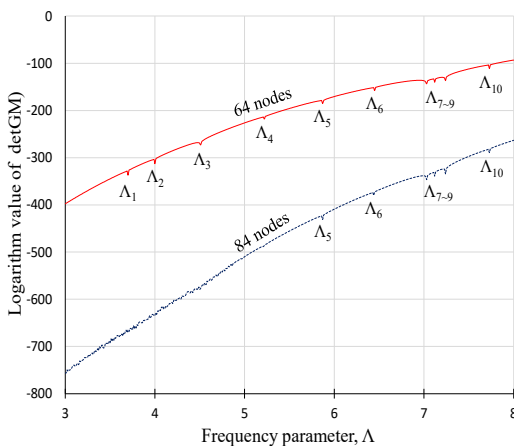


Fig. 3 Determinant curves of the perforated membrane for 64 and 84 nodes plotted by the conventional NDIF method (Eq. (16))

Table 1 Eigenvalues of the perforated membrane obtained by the conventional NDIF method using Eq. (16), FEM (ANSYS) and the proposed method using Eq. (17)

	Conventional NDIF method		FEM (880 nodes)	Proposed method (84 nodes)
	64 nodes	84 nodes		
Λ_1	3.70	N/P	3.67	3.60
Λ_2	4.00	N/P	3.99	3.99
Λ_3	4.51	N/P	4.53	4.50
Λ_4	5.22	N/P	5.19	5.19
Λ_5	5.87	5.87	5.89	5.86
Λ_6	6.45	6.44	6.51	6.43
Λ_7	7.03	7.03	7.07	7.03
Λ_8	7.12	7.12	7.24	7.11
Λ_9	7.24	7.24	7.39	7.25
Λ_{10}	7.73	7.73	7.73	7.73

먼저 구하였다. 이 랭크 함수를 구할 때 임계값 10^{-10} 을 적용하여, 이 임계값 보다 작은 특이값(singular value)들은 수치적 노이즈로 처리하였다. 지면 관계상 이 임계값과 관련된 구체적인 연구 결과는 후속 논문에서 제시될 예정이다.

Fig. 4의 랭크 함수를 식 (17)에 적용하여 84노드 이산 모델에 대한 판별식 곡선을 구하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 판별식 곡선을 살펴보면 랭크의 불연속인 변화로 인해 판별식 곡선 또한 심한 불연속성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 불연속성이 존재하는 현재의 복잡한 개형의 판별식 곡선을 자세히 살펴보면, 저차 고유치 소실 없이 10개의 고유치들($\Lambda_1 \sim \Lambda_{10}$)이 모두 성공적으로 추출되었음을 확인할 수 있다. 이들 10개의 고유치 중 Λ_9 를 제외한 나머지 고유치들은 골(trough)의 형태로 나타나나, Λ_9 는 피크(crest)의 형태로 나타났다. 이러한 차이에 대한 추가 연구 결과는 후속 논문에서 제시한다.

불연속성이 존재하는 현재의 판별식 곡선에서 고유치 추출의 용이성을 위해 이전 연구에서 제안된 불연속성 제거법을 적용하여 판별식 곡선을 얻으면 Fig. 6과 같다⁽⁷⁾. 불연속성이 제거된 Fig. 6의 판별식 곡선을 살펴보면, 고유치 소실 없이 10개의 고유치($\Lambda_1 \sim \Lambda_{10}$)가 명확하게 골의 형태로 나타남을 확인

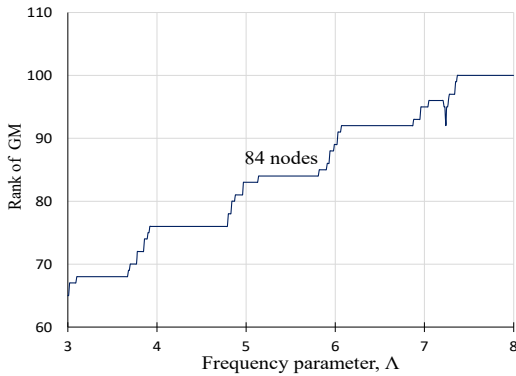


Fig. 4 Rank function of **GM** for the perforated membrane discretized with 84 nodes

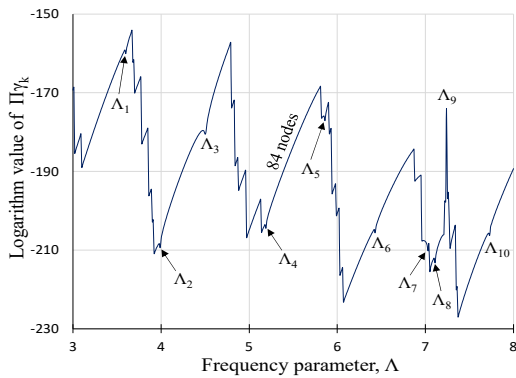


Fig. 5 Determinant curve with discontinuities for the 84-node perforated membrane plotted by the proposed method (Eq. (17))

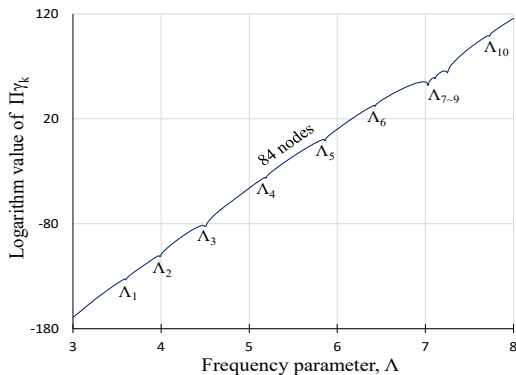


Fig. 6 Discontinuity-free Determinant curve for the 84-node perforated membrane plotted by the proposed method (Eq. (17))

할 수 있으며, 이들 고유치들은 Table 1의 마지막 열에 정리되었다. 이 고유치들을 두 번째 열에 있는 기존 방법(64노드) 및 FEM 고유치들과 비교해보면, 첫 번째 고유치를 제외한 나머지 고유치들은 거의 일치된 결과를 가짐을 확인할 수 있다. FEM 첫 번째 고유치가 3.67임 점을 가만하면 가상의 엄밀해는 3.67보다 낮은 값을 가질 것이라 예상할 수 있다. 이러한 사실부터 제안된 방법에 의해 구한 첫 번째 고유치 3.60은 타당한 결과라고 말할 수 있다. 참고로 보다 다양한 형상을 가진 멤브레인에 대한 예제 검증 결과는 후속 논문에서 제시할 예정이다.

4. 결 론

이 연구에서는 구멍이 있는 멤브레인에 대해 영역 분할법 기반 NDIF법을 적용하였을 때, 노드 수 증가에 따라 저차 고유치 소실 문제가 발생하는지를 검토하였다. 또한 오목 멤브레인에 대해 최근 제안된 개선된 NDIF법이 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 유효한지를 확인하고, 아울러 기존 영역분할법 기반 NDIF법에서 분할 영역 수가 달라질 때마다 최종 시스템 행렬식을 새로 유도해야 하는 단점을 개선하였다.

예제 검토 결과, 기존 영역분할법 기반 NDIF법은 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 노드 수 증가 시 저차 고유치 소실 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다. 반면, 새로이 제안된 영역분할법 기반 NDIF법을 구멍이 있는 멤브레인 문제에 적용한 결과, 기존 방법에서 나타나는 저차 고유치 소실 문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 확인하였다. 또한 이 연구에서는 분할 영역 수의 변화에 따라 최종 시스템 행렬식을 반복적으로 새로 유도해야 했던 기존 방법의 단점을 개선함으로써, 보다 일반적이고 체계적인 형태로 최종 시스템 행렬을 구성할 수 있음을 보였다.

아울러, 예제 문제에 대한 수치 검증 결과, 제안된 방법은 구멍이 있는 멤브레인에 대해서도 노드 수에 상관없이 전 주파수 대역에서 고유치를 안정적이고 정확하게 추출할 수 있음을 확인하였다. 따라서 이 연구는 구멍이 있는 멤브레인에 대한 저차 고유치 소실 문제를 해결하고, 동시에 분할 영역 수 변화에 보다 유연하게 대응할 수 있는 최종 시스템 행렬 정식화를 제시하였다는 점에서 의의를 가진다.

후 기

이 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원 과제임.

References

- (1) Bathe, K., 1982, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, 2nd Edition, Prentice-hall, NJ, United States, pp. 1~735.
- (2) Brebbia, C. A., Telles, J. C. F. and Wrobel, L. C., 1984, Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering, Springer-verlag, Berlin, Germany.
- (3) Kang, S. W., Lee, J. M. and Kang, Y. J., 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.
- (4) 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.
- (5) Kang, S. W., 2024, Development of the NDIF Method based on the Sub-domain Method Overcoming 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.
- (6) Kang, S. W., 2025, Development of Non-dimensional Dynamic Influence Function Method Based on Three-domain Decomposition Approach for Eigenvalue Extraction over Entire Frequency Range of Concave Membranes: Part 1(Theoretical Formulation and Verification), Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 409~416.
- (7) Kang, S. W., 2020, Lower-order and Higher-order Eigenmode Analyses of Arbitrarily Shaped Membranes Using Non-dimensional Dynamic Influence Function Method, Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 44, No. 12, pp. 971~977.