Check for updates

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 36(5) : 472~481, 2026
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2026.36.5.472

한국소음진동공학회논문집 제 36 권 제 5호, pp. 472~481, 2026
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

반전력법 기반 모달 감쇠비 검증 방법에 관한 연구

A Study on a Half-power-based Modal Damping Ratio Validation Method

김 현 우* · 서 유 종* · 김 찬 중†
Hyeon-Woo Kim*, Yu-Jong Seo* and Chan-Jung Kim†

(Received July 21, 2026 ; Revised September 6, 2026 ; Accepted September 8, 2026)

Key Words : Modal Damping Ratio(모달 감쇠비), Half-power Method(반전력법), Stabilization Diagram(안정화 다이어그램), PolyMAX Algorithm(PolyMAX 알고리즘), Experimental Modal Analysis(실험적 모달 해석)

ABSTRACT

Stabilization diagrams based on the PolyMAX algorithm are widely used to identify resonance frequencies and modal damping ratios in experimental modal analysis. Although resonance frequencies generally remain stable with increasing model order, the identified damping ratios may vary because they are estimated from curve-fitted frequency response functions (FRFs). This sensitivity becomes more significant in anisotropic composite structures. This study investigated the applicability of the half-power method as a supplementary criterion for validating modal damping ratios identified from stabilization diagrams. Impact hammer tests were performed on an isotropic SUS304 plate and carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) plates with different fiber orientations. The damping ratios obtained from the stabilization diagram were compared with those estimated directly from the measured FRFs using the half-power method. The results show that resonance frequencies remained stable, whereas the identified damping ratios exhibited noticeable variations under identical resonance conditions. The half-power method consistently provided damping estimates that agreed well with physically meaningful mode shapes. The proposed approach can therefore improve the reliability of modal damping ratio identification while preserving the conventional stabilization-diagram-based modal analysis procedure.

1. 서 론

기계 및 구조물의 동적 특성을 규명하기 위한 실험모달해석(experimental modal analysis)은 구조물의 고유진동수, 모달 감쇠비 및 모드 형상을 식별하는 대표적인 기법으로 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다[1~4]. 이러한 모달 파라미터는 구조 건전성 평가, 진동 저감 설계, 피로수명 예측 및 디지털 트윈 기반 상태진단 등 다양한 해석의 기초 자료로 사용되기 때문에 높은 신뢰도의 식별이 요구된다. 특히 최근에는 선박, 자동차, 항공우주 및 복합재 구조물과 같이 동적 특성이 복잡한 구조물의 적용이 증가함에 따라 보다 안정적이고 재현성 있는 모달 파라미터 식

† Corresponding Author ; Member, Pukyong National University, Professor
E-mail : cjkim@pknu.ac.kr
* Pukyong National University, Student

‡ Recommended by Editor Seung Hyun Jeong
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

별의 중요성이 더욱 커지고 있다[5].

실험모달해석에서는 일반적으로 측정된 주파수응답함수(frequency response function, FRF)를 이용하여 구조물의 동특성을 식별한다. 특히 주파수 영역 기반의 모달 파라미터 식별 기법은 시간영역 기법에 비해 계산 효율성이 우수하고 노이즈에 대한 강건성이 높아 가장 널리 사용되고 있다[6]. 이 가운데 PolyMAX 알고리즘은 다항식 기반의 주파수응답함수 근사기법을 이용하여 안정 극값(stable pole)을 추정할 수 있으며, 현재 상용 모달해석 프로그램에서 표준적인 식별 알고리즘으로 사용되고 있다[7]. PolyMAX는 모델 차수를 증가시키면서 추정된 pole의 안정성을 비교하는 안정화 다이어그램(stabilization diagram)을 이용하여 물리적으로 유효한 모드를 판별하며, 이러한 접근은 산업체와 연구기관에서 사실상 표준 절차로 자리 잡고 있다[8~9].

안정화 다이어그램에서는 모델 차수가 증가하더라도 동일한 공진주파수에서 반복적으로 나타나는 극값(pole)을 안정 극값으로 판단하며, 분석자는 이를 실제 구조물의 물리적 모드로 해석한다. 일반적으로 안정 극값은 주파수 안정성, 감쇠 안정성 및 MAC(modal assurance criterion)를 종합적으로 고려하여 선택된다[10]. 이와 같은 절차는 공진주파수 식별에서는 매우 높은 재현성을 나타내며 실제 산업 현장에서도 높은 신뢰성을 확보하고 있다.

그러나 모달 감쇠비는 공진주파수와는 다른 특성을 가진다. PolyMAX 알고리즘에서 감쇠비는 측정된 FRF로부터 직접 계산되는 물리량이 아니라, 측정 데이터를 가장 잘 근사하는 전달함수의 극값으로부터 계산되는 값이다. 즉, PolyMAX는 실제 전달함수와 근사 전달함수 사이의 오차를 최소화하도록 설계되어 있으며, 최적화 과정에서 얻어진 극값의 위치로부터 모달 감쇠비가 결정된다[11]. 따라서 전달함수의 근사 결과가 매우 유사하더라도 극값의 실수부가 미세하게 변화하면 감쇠비는 상대적으로 큰 편차를 나타낼 수 있다. 반면 공진주파수는 극값의 허수부에 의해 결정되므로 동일한 조건에서도 상대적으로 안정적인 결과를 유지하게 된다.

이러한 특성은 특히 방향성을 갖는 탄소섬유 복합소재와 같은 비등방성 구조물에서 더욱 두드러질 수 있다. 복합재 구조물은 적층 방향에 따른 강성 변화, 재료 감쇠의 방향성 및 인접 모드 간 상호작용으로 인해 등방성 금속 구조물보다 복잡한 동적 거동을 나타낸다[12~14]. 결과적으로 동일한 공진대역에서도 모델 차수나 곡선 근사 조건에 따라 감쇠비가 크게 달라질 가능성이 존재하며, 경우에 따라서는 서로 유사한 공진주파수를 갖는 복수의 안정 극값이 서로 다른 감쇠비를 나타내기도 한다. 이러한 현상은 안정화 다이어그램에서 공진주파수는 안정적으로 식별되더라도 감쇠비의 신뢰성을 판단하기 어렵게 만드는 원인으로 작용한다.

기존 연구에서는 반전력법(half-power method)을 이용하여 단일 자유도 시스템의 감쇠비를 계산하거나 곡선 접합(curve-fitting) 기반 감쇠비와 비교하는 연구가 다수 수행되었다[15~17]. 그러나 대부분의 연구는 반전력법 자체의 감쇠 추정 정확도에 초점을 두고 있으며, 안정화 다이어그램에서 식별된 모달 감쇠비의 신뢰성을 평가하기 위한 독립적인 기준으로 활용한 사례는 매우 제한적이다. 또한 PolyMAX 알고리즘의 FRF 근사 특성과 감쇠비 민감성의 관계를 이론적으로 설명하고 이를 실험적으로 검증한 연구 역시 부족한 실정이다.

이 연구에서는 PolyMAX 알고리즘을 이용한 기존의 공진주파수 식별 절차는 그대로 유지하면서, 모달 감쇠비의 신뢰성을 평가하기 위한 보조적인 검증 기준으로 반전력법을 적용하였다. 이를 위하여 등방성 재료인 SUS304 평판과 방향성을 갖는 탄소섬유 복합재(CFRP) 평판에 대해 충격가진 실험을 수행하고, 안정화 다이어그램에서 식별된 모달 감쇠비와 실제 FRF의 반전력 대역폭으로부터 계산된 감쇠비를 비교하였다. 또한 동일 공진대역에서 나타나는 복수 극값의 감쇠 특성과 모드 형상의 관계를 함께 분석하여 감쇠비 판별 특성을 고찰하였다.

이 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, PolyMAX 기반 모달 식별에서 공진주파수와 모달 감쇠비가 서로 다른 수치적 안정성을 갖는 원인을 FRF 곡선 근사 관점에서 분석하였다. 둘째, 반전력법을 새로운 감쇠 추정 기법이 아닌 실제 FRF에 기반한 독립적인 물리 기준으로 활용하여 안정화 다이어그램에서 식별된 모달 감쇠비의 신뢰성을 평가하는 새로운 접근 방법을 제안하였다. 셋째, 등방성 구조물과 비등방성 복합재 구조물에 대한 비교 실험을 통하여 제안한 방법의 적용 가능성을 확인하고, 향후 모달 감쇠비의 자동 판별 기법으로 확장할 수 있는 기반을 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 PolyMAX 기반 모달 파라미터 식별

실험모달해석에서는 측정된 주파수응답함수를 이용하여 구조물의 동특성을 식별한다. 최근에는 주파수영역 기반의 다양한 식별기법이 개발되었으며, PolyMAX 알고리즘은 우수한 수치적 안정성과 높은 식별 정확도로 인해 상용 모달해석 소프트웨어에서 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이다. PolyMAX 알고리즘은 측정된 FRF를 유리함수(rational function) 형태로 근사하고, 근사된 전달함수의 극값으로부터 공진주파수, 모달 감쇠비 및 모드 형상을 동시에 추정한다. 근사 전달함수는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\hat{H}(s)=\frac{\hat{B}(s)}{\hat{A}(s)} \tag{1}$$

여기서, $\hat{A}(s)$, $\hat{B}(s)$는 각각 분모 및 분자 다항식을 나타낸다. PolyMAX 알고리즘은 측정된 FRF와 근사 전달함수 사이의 오차를 최소화하도록 다항식 계수를 결정하며, 이러한 과정은 식 (2)의 최소제곱 문제로 표현할 수 있다.

$$\hat{\theta}=\arg\min_{\theta}\sum_{i=1}^{N}\left|H(\omega_i)-\hat{H}(\omega_i,\theta)\right|^2 \tag{2}$$

여기서, $H(\omega)$는 측정된 FRF이며, $\hat{H}(\omega)$는 근사된 전달함수이다. 식 (2)의 목적함수는 측정된 FRF를 가장 정확하게 재현하는 전달함수를 찾는 것이며, 감쇠비 자체를 직접 최적화하는 과정은 포함하지 않는다. 최적화된 전달함수의 극값은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$s_r=\sigma_r\pm j\omega_{d,r} \tag{3}$$

여기서 σ_r는 극값의 실수부이며 $\omega_{d,r}$는 감쇠 고유진동수를 의미한다. 이에 따라 극값의 음수 값을 가지는 실수부(σ_r), 감쇠 고유진동수($\omega_{d,r}$), 모달 감쇠비(ζ_r)는 각각 식 (4) ~ 식 (6)으로 계산된다[16,18].

$$\sigma_r=-\zeta_r\omega_{n,r} \tag{4}$$

$$\omega_{d,r}=\omega_{n,r}\sqrt{1-\zeta_r^2} \tag{5}$$

$$\zeta_r=\frac{\sigma_r}{\sqrt{\sigma_r^2+\omega_{d,r}^2}} \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)는 동일한 극값으로부터 공진주파수와 감쇠비가 동시에 계산됨을 의미한다. 그러나 두 파라미터는 극값의 서로 다른 성분으로부터 계산되므로 동일한 수치적 안정성을 갖는 것은 아니다.

2.2 곡선 근사 기반 모달 감쇠비의 수치적 민감성

식 (2)에서 알 수 있듯이, PolyMAX 알고리즘의 목적은 측정된 FRF를 가장 잘 재현하는 전달함수를 찾는 것이다. 따라서 최적화 과정은 FRF의 근사 오차를 최소화하는 방향으로 수행되며, 모달 감쇠비의 정확도를 직접 평가하거나 최적화하는 과정은 포함하지 않는다. 실제 실험에서는 모델 차수, 초기 추정값, 측정 노이즈 및 잔여항(residual term)의 처리 방법이 달라지더라도 매우 유사한 FRF를 얻을 수 있다. 즉, 서로 다른 극값 집합이 동일한 수준의 전달함수 근사 성능을 나타낼 수 있다. 이러한 관계는 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\hat{H}_1\approx\hat{H}_2 \tag{7}$$

여기서, $\hat{H}_1$, $\hat{H}_2$는 서로 다른 곡선 근사 조건에서 얻어진 FRF를 각각 의미한다. 식 (7)은 두 전달함수가 측정된 FRF를 거의 동일한 수준으로 재현할 수 있음을 나타낸다. 그러나 전달함수가 유사하다고 하여 극값이 반드시 동일한 것은 아니다. 실제로 서로 다른 전달함수 근사 과정에서는 식 (8)에서와 같이 서로 다른 극값 집합이 식별될 수 있다.

$$p_1\neq p_2 \tag{8}$$

여기서, p_1, p_2는 각각 서로 다른 곡선 근사 조건에서 식별된 극값을 의미한다. 이 경우 공진주파수는 극값의 허수부에 의해 결정되므로 큰 변화 없이 유지될 수 있지만, 극값의 실수부는 서로 다른 값을 나타낼 수 있다. 따라서 식 (6)에 의해 계산되는 모달 감쇠비 역시 식 (9)와 같이 서로 다른 값이 도출될 수 있다.

$$\zeta_1\neq\zeta_2 \tag{9}$$

즉, 공진주파수의 안정성이 반드시 모달 감쇠비의 안정성을 의미하는 것은 아니다. 안정화 다이어그램에서는 동일한 공진주파수에서 안정 극값이 반복적으로 나타나는 경우 이를 물리적 모드로 판단하지만, 해당 극값의 감쇠비는 전달함수의 근사 조건에 따라 서로 다른 값을 나타낼 수 있다. 이러한 현상은 등방성 구조물보다 방향성 강성과 모드 결합이 존재하는 복합재 구조물에서 더욱 크게 나타날 가능성이 있다. 따라서 안정 극값의 신뢰성을 판단하기 위해서는 공진주파수뿐 아니라 모달 감쇠비의 신뢰성을 독립적으로 평가할 수 있는 기준이 필요하다.

2.3 반전력법 기반 감쇠비 검증

반전력법은 공진응답의 대역폭을 이용하여 감쇠비를 추정하는 대표적인 방법으로, 단일모드 거동이 지배적인 공진대역에서 높은 신뢰성을 갖는 것으로 알려져 있다. 공진주파수를 f_n, 최대 응답의 $1/\sqrt{2}$이 되는 주파수를 각각 f_1, f_2라고 하면, 감쇠비(ζ)는 식 (10)으로 계산된다[15].

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \tag{10}$$

식 (10)은 실제 측정된 FRF의 공진대역폭으로부터 직접 계산되므로 전달함수의 근사 과정이나 모델 차수의 영향을 받지 않는다[15]. 물론 반전력법은 인접 모드의 간섭이 작은 단일모드 영역에서 적용되어야 한다는 한계가 있다[17]. 하지만, 모드 간섭에 대한 영향이 작은 경우에는 FRF의 물리적 응답 특성을 직접 반영하는 감쇠비를 제공할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 반전력법을 PolyMAX 알고리즘을 대체하는 감쇠 추정 기법으로 사용하지 않는다. 대신, 기존 알고리즘으로 식별된 안정 극값의 감쇠비를 검증하기 위한 독립적인 물리 기준으로 활용한다. 이러한 접근은 기존 모달 식별 절차를 그대로 유지하면서도 감쇠비의 신뢰성을 보다 객관적으로 평가할 수 있다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다.

반전력법을 활용할 수 있는지를 판단하는 기준은 식 (10)을 참조할 때 대상 공진점(f_n)을 기준으로 필요한 2개의 주파수들(f_1, f_2)이 신뢰성을 가지고 있는지 여부이다. 인근 모드의 영향이 큰 경우 해당 2개의 주파수 범위 내에 다른 공진점의 영향이 있기 때문에 반전력법으로 도출된 감쇠 값을 왜곡할 수 있기 때문이다. 따라서, 제안된 방법을 보조 지표로 사용할 경우 인근 공진점의 영향도를 살펴 유효성을 판단할 필요가 있다. 이를 객관적으로 판단할 수 있는 지표 설정 등은 이 연구에서 별도 다루지 않았다.

3. 시편을 활용한 감쇠 데이터 분석

3.1 실험 구성

제안한 모달 감쇠비 검증 방법의 적용 가능성을 확인하기 위하여 등방성 금속 재료와 비등방성 복합재료를 대상으로 충격가진 기반의 실험 모달해석을 수행하였다.

이 연구에서는 등방성 재료로 SUS304 평판(150 mm × 80 mm × 3 mm)을 사용하였으며, 비등방성 재료로는 동일한 평면 형상을 갖는 12 ply CFRP 평판(150 mm × 80 mm × 2 mm)을 사용하였다. CFRP 시편은 섬유 배향각을 각각 0°, 15° 및 30°로 제작하여 방향성에 따른 감쇠 특성의 변화를 비교하였다. 모든 실험은 자유-자유(free-free) 경계조건에서 수행하였으며, 시편은 탄성 지지체를 이용하여 외부 구속조건의 영향을 최소화하였다. 구조물의 동적 응답은 가속도계 센서들(모델명: 3224A/Dytran, 3225F/Dytran)을 이용하여 측정하였으며, 가진은 임팩트 해머(모델명: 5800SL/Dytran)를 이용하여 수행하였다. 응답 신호는 LMS SCADAS 데이터 취득 시스템으로 계측하였고, siemens simcenter testlab(버전 15A) 상용 프로그램을 이용하여 FRF를 계산하였다.

모드 형상을 식별하기 위하여 시편 표면에는 총 15개의 측정점을 배치하였다. 각 측정점에서 획득한 FRF를 이용하여 PolyMAX 알고리즘으로 안정화 다이어그램을 생성하였으며, 모델 차수를 증가시키면서 안정 극값을 식별하였다. 이후 각 극값의 공진주파수와 모달 감쇠비를 추출하여 분석하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 등방성 소재와 비등방성 소재에 대한 시편을 각각 보여준다.

3.2 모달 감쇠비 검증 절차

공진주파수의 식별 정확도를 평가하는 것이 아니라 안정화 다이어그램에서 식별된 모달 감쇠비의 신뢰성을 검증하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 먼저 PolyMAX 알고리즘을 이용하여 안정 극값을 식별하고, 동일한 공진대역에서 도출된 모든 극값의 공

진주파수와 모달 감쇠비를 계산하였다.

동일한 공진대역에 대해서는 측정된 FRF로부터 반전력법을 이용하여 감쇠비를 독립적으로 계산하였다. 반전력법은 전달함수의 곡선 근사 결과가 아닌 실제 측정된 FRF의 공진 대역폭을 이용하여 감쇠비를 산정하므로 모델 차수나 수치 최적화 과정의 영향을 받지 않는다. 따라서 반전력법으로 계산된 감쇠비를 안정 극값의 감쇠비를 검증하기 위한 물리적 기준으로 활용하였다. 또한 동일한 안정 극값에 대응하는 모드 형상을 함께 비교하여 반전력법으로 계산된 감쇠비와 유사한 극값이 실제 물리적 모드와 일치하는지를 확인하였다. 동일한 분석 절차를 SUS304와 CFRP 시편에 동일하게 적용함으로써 재료 특성에 따른 감쇠비의 변화 양상을 비교하였다.

다만, 기존 연구에서 언급한 바와 같이 감쇠비가 큰 시스템에 대해서는 별도의 간단한 식 (10)를 사용하기 보다는 보정된 수식을 사용해야 한다고 제안된다[17]. 특히 감쇠비가 0.1(10 %) 이하인 범위에서는 일반적인 반전력법이 실용적으로 충분한 정확도를 갖는 반면, 감쇠비가 증가할수록 근사 오차가 커질 수 있음을 제시하였다[19]. 이 연구에서 사용될 시편은 감쇠비가 큰 케이스가 탄소복합소재인데 해당 소재의 감쇠비는 등방성 소재 대비 높지만 감쇠비가 0.1 이상을 초과하는 경우는 없으므로 식 (10)이 여전히 유효하다고 가정하고 감쇠비를 측정하는데 사용하였다.

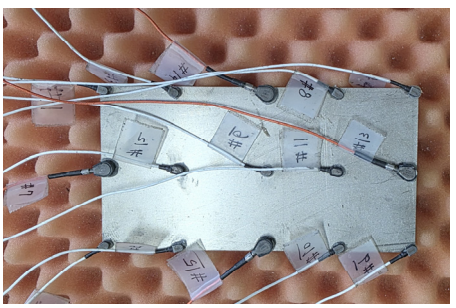


Fig. 1 Isotropic SUS304 specimen with attached accelerometers (#1 ~ #15)

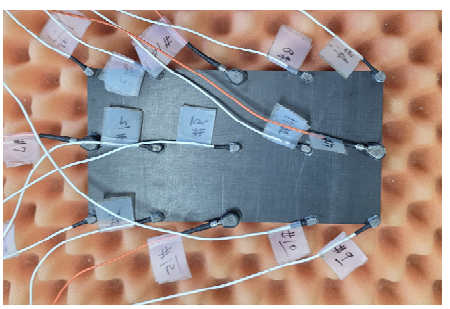


Fig. 2 Anisotropic CFRP specimen with attached accelerometers (#1 ~ #15)

3.3 등방성 시편의 모달 감쇠비 분석

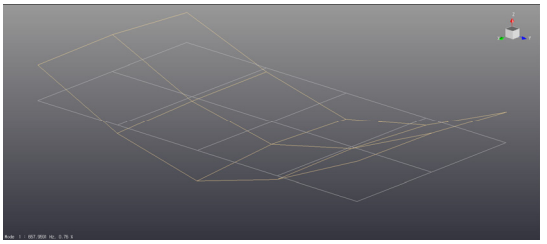
SUS304 시편에 대하여 주파수 대역을 최대 5000 Hz까지 설정하였으며 다항식의 차수는 최대 100으로 설정하여 PolyMAX 알고리즘으로 분석한 결과는 Table 1과 같다. 대부분의 공진대역에서는 하나의 안정 극값이 식별되었으나, 일부 공진대역에서는 매우 유사한 공진주파수를 갖는 두 개 이상의 안정 극값이 동시에 존재하는 현상이 관찰되었다. Table 1 결과를 기준으로 660 Hz 인근의 첫 번째 모드(1-A, 1-B)와 1830 Hz 인근의 3번째 모드(3-A, 3-B)가 이에 해당한다. 공진점의 경우에는 유사한 주파수에서 식별이 되었으나 감쇠비는 매우 상이함을 알 수 있다. 따라서, PolyMAX 알고리즘을 적용할 경우 공진점은 강건성을 가지고 있으나 감쇠비는 변동이 상대적으로 크다.

Fig. 3과 Fig. 4는 2개의 공진점이 식별된 주파수 대역에서의 모드형상 정보를 각각 도시하였다. 원래 측정된 #1 ~ #15 측정 위치를 고려한 원래 모달 모델로부터 해당 공진점에 해당하는 모드형상을 중첩하여 보여준다.

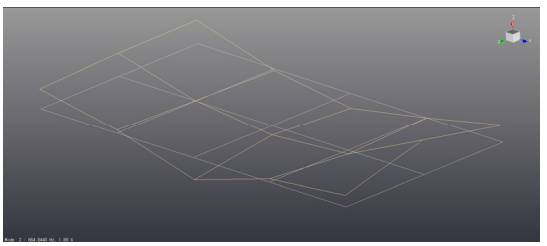
Table 1의 결과로부터 1차, 3차 모드의 경우 유사한 모드 형상을 보이지만 감쇠비의 차이에 의해 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이 연구의 결과를 적용하기 위해 3개의 공진 구간에 대해 반전력법으로 감쇠비를 별도로 계산하였다. 분석 결과 감쇠비 값이 작은 1-A, 3-A 경우가 각각 반전력법 결과와 유사함을 알 수 있다. 해당 결과를 반영하여 두 가지 서로

Table 1 Modal analysis result from PolyMAX algorithm

#	Resonance freq. [Hz]	Damping ratio [%]
1-A	657.96	0.77
1-B	664.84	1.89
2	1654.03	1.01
3-A	1831.60	0.66
3-B	1845.10	1.62

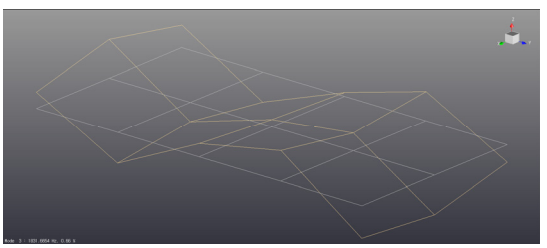


(a) 1-A (657.96 Hz)

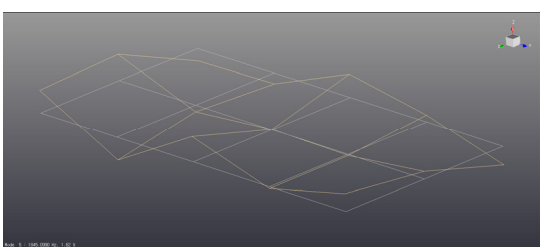


(b) 1-B (664.84 Hz)

Fig. 3 First mode shape of SUS304 specimen



(a) 3-A (1831.60Hz)



(b) 3-B (1845.10Hz)

Fig. 4 Third mode shape of SUS304 specimen

Table 2 Comparison of damping ratio for different analysis method

#	Half-power	PolyMAX	Relative error [%]
1-A	0.79	0.77	2.53
1-B		1.89	139.24
2	1.08	1.01	6.48
3-A	0.67	0.66	1.49
3-B		1.62	141.79

다른 방법으로 도출된 감쇠비를 Table 2에 비교하였다. 여기서, 상대 오차는 반전력법 결과를 기준으로 계산하였다.

대부분의 단일모드 공진영역에서는 반전력법과 안정 극값의 감쇠비가 비교적 잘 일치하였으며, 상대오차도 작은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 등방성 구조물에서는 반전력법이 안정 극값의 감쇠비를 검증하기 위한 기준으로 활용될 수 있음을 보여준다.

3.4 탄소복합소재 시편의 모달 감쇠비 분석

탄소 섬유와 수지 물성으로 구성된 결합 매트릭스(matrix)로 구성된 탄소복합소재는 기존 연구에서 사용하였던 복합소재 시편과 동일한 소재를 활용하였다[20]. 오토클래이브(autoclave curing process) 방식을 사용하였으며, 12겹의 단일 방향 프리프레그(UD prepreg)를 적층하여 시편을 구성하였다. 복합소재의 경우 매트릭스 영향에 의해 SUS304 대비 감쇠비의 값이 상대적으로 높고 탄소섬유의 특정 방향에 따라 모드 간의 간격 변화, 복소 모드 증가 등이 나타날 가능성이 크므로 등방성 시편뿐만 아니라 복합소재 기반의 시편도 고려를 한 것이다.

등방성 시편과 동일한 실험적 모달해석을 탄소복합소재 시편에 적용한 결과, 등방성 재료와는 다른 경향이 관찰되었다. Table 3의 결과를 통해 탄소섬유 방향이 0°인 경우(CFRP-0degree) 대역에서 하나의 안정 극값이 식별되었으며, PolyMAX와 반전력법으로 계산된 감쇠비가 비교적 유사하게 나타남을 Table 4를 통해 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5와 같이 각 공진점에서 서로 구분되는 모드형상이 확인되었다. 따라서 하나의 지배적인 모드가 나타나는 경우에는 탄소복합소재 시편에서도 반전력법과 안정 극값의 감쇠비가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

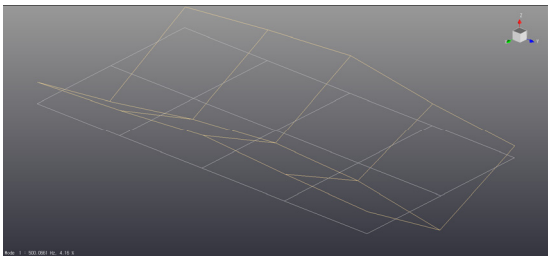
섬유 배향각이 15°인 시편의 경우 Table 5와 같이 740 Hz 및 1030 Hz 인근의 공진대역에서 각각 두 개의 안정 극값이 식별되었다. 각 극값은 유사한 공진

Table 3 Modal analysis result from PolyMAX algorithm (CFRP-0 degree)

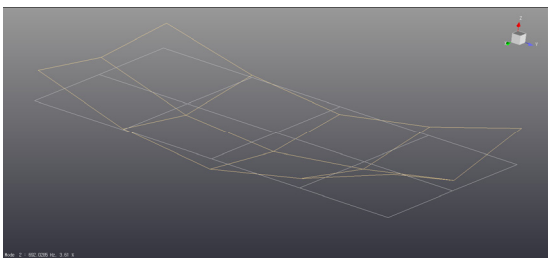
#	Resonance freq. [Hz]	Damping ratio [%]
1	500.07	4.16
2	692.03	3.61
3	1072.06	4.15

Table 4 Comparison of damping ratio for different analysis method (CFRP-0 degree)

#	Half-power	PolyMAX	Relative error [%]
1	4.34	4.16	4.15
2	3.71	3.61	2.70
3	4.11	4.15	0.97



(a) 500.07 Hz



(b) 692.03 Hz



(c) 1072.06 Hz

Fig. 5 Three mode shape of CFRP-0° specimen

Table 5 Modal analysis result from PolyMAX algorithm (CFRP-15 degree)

#	Resonance freq. [Hz]	Damping ratio [%]
1-A	739.98	2.77
1-B	750.86	1.33
2-A	1,032.27	4.60
2-B	1,036.90	1.72

주파수를 나타냈으나 감쇠비는 서로 상이하였으며, 반전력법과 유사한 감쇠비를 갖는 극값에서 상대오차가 작게 나타났다. 세부 비교 결과는 Table 6에 정리하였다.

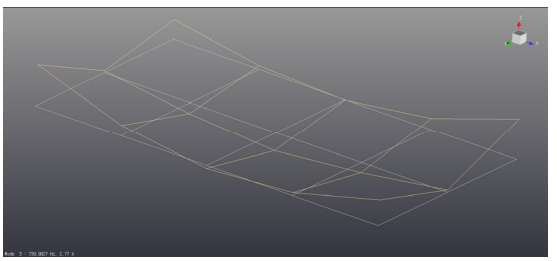
Fig 6과 Fig. 7은 SUS304와 동일하게 2개의 공진점이 식별된 주파수 대역에서의 모드형상 정보를 각각 도시하였다.

모드 형상을 비교한 결과에서는 반전력법과 유사한 감쇠비를 갖는 1-A와 2-A에서 상대적으로 명확한 모드 형상이 나타났으며, 감쇠비 차이가 큰 1-B, 2-B에서 모드 형상의 불연속성 또는 국부적 왜곡이 함께 관찰되었다. 이러한 경향은 등방성 재료에서 확인된 결과와 유사하지만, 복합재에서는 그 차이가 더욱 크게 나타났다.

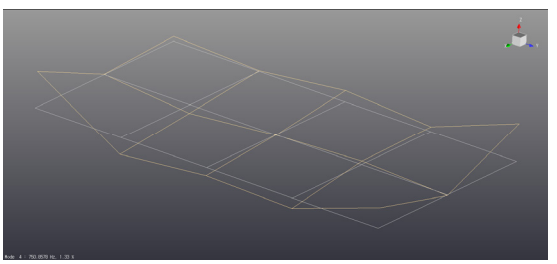
섬유 배향각이 30°인 시편에 대한 PolyMAX 분석

Table 6 Comparison of damping ratio for different analysis method (CFRP-15 degree)

#	Half-power	PolyMAX	Relative error [%]
1-A	3.28	2.77	15.55
1-B		1.33	59.45
2-A	4.95	4.60	7.07
2-B		1.72	65.25



(a) 1-A (739.98 Hz)



(b) 1-B (750.86 Hz)

Fig. 6 First mode shape of CFRP-15° specimen

결과를 Table 7에 정리를 하였다. Table 8에 정리된 바와 같이 440 Hz 인근 대역에서 하나의 안정 극값이 식별되고 감쇠비도 동일하다. 550 Hz 인근 공진 대역에서는 두 개의 극값이 식별되었으며 서로 다른 감쇠비를 보인다.

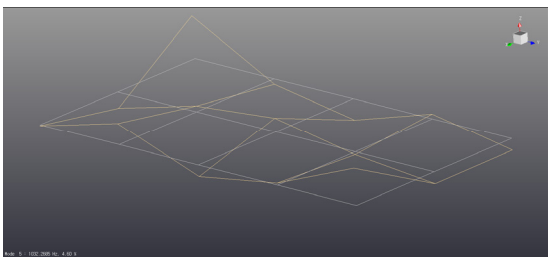
섬유 배향각이 15°인 시편과 달리 30°인 시편의 경우에는 Fig. 8과 같이 두 극값의 주파수와 모드형상이 유사하게 나타났으며, 두 모드 형상 간 MAC값은 약 0.95로 높은 상관성을 보였다. 이와 같은 조건에서도 감쇠비 측면에서는 차이가 있음이 확인되었다.

3.5 모달 감쇠비 검증 결과에 대한 고찰

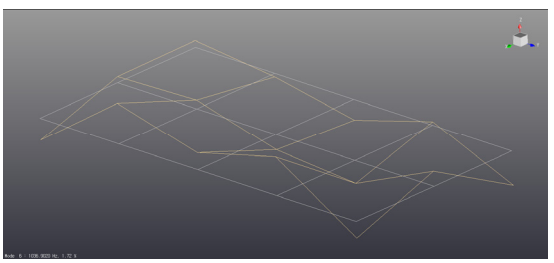
이 연구의 실험 결과는 PolyMAX 알고리즘의 성능을 부정하는 것이 아니라, 모달 감쇠비의 계산 과정이 공진주파수와 서로 다른 수치적 특성을 갖는다는 점을 보여준다. PolyMAX는 측정된 FRF를 가장 잘 재현하는 전달함수를 찾도록 설계되어 있으므로 안정 극값의 공진주파수는 높은 재현성을 유지한다. 반면 모달 감쇠비는 근사된 전달함수의 극값로부터 계산되기 때문에 전달함수의 미세한 변화에도 상대적으로 민감하게 반응할 수 있다.

전체적인 결과를 비교하면, 하나의 극점이 식별되거나 반전력법과 유사한 감쇠비를 갖는 극점에서는 상대오차가 최대 15.55 % 값을 보였다. 반면 동일한 공진대역에서 함께 식별된 다른 극점에서는 최소 34.39 % 값을 보였으며 일부 경우는 최대 141.79 % 오차가 확인되었다. 이러한 차이는 유사한 공진주파수와 모드형상을 갖는 극점이라도 감쇠비의 신뢰성은 서로 다를 수 있음을 보여준다.

모드형상을 비교한 결과에서도 반전력법과 유사한 감쇠비를 갖는 극점에서는 전반적으로 연속적이고 명확한 변형 형상이 나타난 반면, 감쇠비 차이가 큰 일



(a) 2-A (1032.27 Hz)



(b) 2-B (1036.90 Hz)

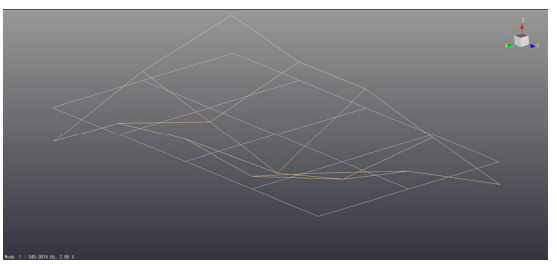
Fig. 7 Second mode shape of CFRP-15° specimen

Table 7 Modal analysis result from PolyMAX algorithm (CFRP-30 degree)

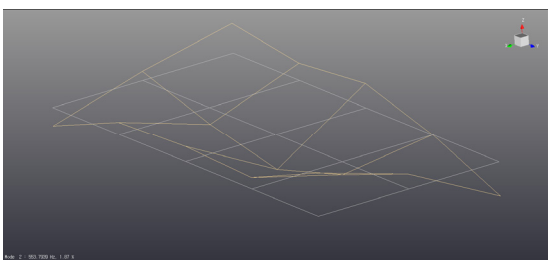
#	Resonance freq. [Hz]	Damping ratio [%]
1	444.20	2.60
2-A	545.99	2.66
2-B	553.79	1.87

Table 8 Comparison of damping ratio for different analysis method (CFRP-30 degree)

#	Half-power	PolyMAX	Relative error [%]
1	2.84	2.60	8.45
2-A	2.85	2.66	6.67
2-B		1.87	34.39



(a) 2-A (545.99 Hz)



(b) 2-B (553.79 Hz)

Fig. 8 Mode shape of CFRP-30° specimen

부 극점에서는 국부적인 불연속이나 왜곡이 확인되었다. 그러나 CFRP-30° 시편과 같이 서로 다른 감쇠비를 갖는 극점에서 유사한 모드형상이 나타나는 경우도 존재하였다. 따라서 모드형상은 극점의 물리적 타당성을 판단하기 위한 중요한 기준이지만, 모드형상만으로 감쇠비의 신뢰성을 구분하는 데에는 한계가 있다. 이러한 결과는 모드형상과 함께 반전력법으로 산출된 감쇠비를 비교함으로써 극점 판별의 신뢰성을 보완할 필요가 있음을 보여준다.

이러한 결과는 반전력법은 PolyMAX 알고리즘을 대체하는 방법이 아니라, 동일한 공진대역에서 식별된 복수의 극점을 비교하기 위한 보조 기준으로 활용할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

이 연구에서는 안정화 다이어그램 기반 모달 식별 과정에서 동일한 공진대역에 존재하는 안정 극값의 모달 감쇠비 신뢰성을 평가하기 위하여 반전력법을 이용한 검증 방법을 제안하였다. 이를 위하여 등방성 SUS304 평판과 비등방성 CFRP 평판을 대상으로 충격가진 실험을 수행하고, PolyMAX 알고리즘으로 식별된 모달 감쇠비와 실제 FRF의 반전력 대역폭으로부터 계산된 감쇠비를 비교하였다.

실험 결과, 공진주파수는 모델 차수와 모달 식별 과정에서도 높은 안정성을 유지하였으나, 동일한 안정 극값에서 계산된 모달 감쇠비는 전달함수의 근사 조건에 따라 서로 다른 값을 나타내는 경우가 확인되었다. 이러한 경향은 등방성 구조물보다 방향성을 갖는 CFRP 구조물에서 더욱 두드러졌으며, 동일한 공진주파수를 유지하면서도 감쇠비는 상대적으로 큰 편차를 나타내었다. 이는 안정화 다이어그램에서 공진주파수의 안정성이 반드시 모달 감쇠비의 안정성을 의미하지는 않음을 보여준다.

반면 반전력법으로 계산된 감쇠비는 실제 측정된 FRF의 공진대역폭을 직접 이용하므로 전달함수의 근사 과정이나 모델 차수의 영향을 거의 받지 않았으며, 단일모드 거동이 우세한 공진영역에서는 안정 극값의 감쇠비와 높은 일치성을 나타내었다. 또한 반전력법과 유사한 감쇠비를 갖는 극값에서 상대적으로 명확한 모드 형상이 확인되어, 반전력법이 안정 극값의 모달 감쇠비 신뢰성을 평가하기 위한 보조적인 검증 기준으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

이 연구는 PolyMAX 알고리즘을 대체하거나 새로운 모달 감쇠 추정 알고리즘을 제안하는 것이 아니라 기존 안정화 다이어그램 기반 모달 식별 절차를 유지하면서 실제 FRF로부터 계산된 감쇠비를 이용하여 모달 감쇠비의 신뢰성을 검증하는 절차를 제안한 데 의의가 있다. 여전히 PolyMAX 알고리즘에 의해 식별되는 모달 파라미터에 대한 신뢰도는 여전히 높다는 가정 아래에서 곡선근사 차수 변화에 민감한 모달 감쇠비의 단점을 극복하기 위한 방안으로 반전력법을 제안한 것이다. 특히 FRF 곡선 근사 과정에서 발생할 수 있는 감쇠비의 수치적 민감성을 실험적으로 확인하고, 이를 보완할 수 있는 비교 기준을 제시하였다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다.

제안한 방법은 기존 상용 모달해석 소프트웨어의 알고리즘을 수정하지 않고도 적용할 수 있으며, 선박, 자동차, 항공우주 및 복합재 구조물과 같이 모달 감쇠비의 신뢰성이 중요한 분야에서 안정 극값의 객관적인 판별을 위한 보조적인 절차로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만 이 연구는 단일모드 거동이 비교적 명확한 공진영역을 대상으로 수행되었으며, 인접 모드 간 중첩이 심한 구조물이나 운전 중 가진 조건에 대해서는 충분한 검증이 이루어지지 않았다. 모드 중첩의 영향도가 큰 경우 반전력법 등을 수정하여 활용할 수 있는 방안 혹은 다른 보조 수단에 대한 연구는 추가 연구되어야 할 부분이다.

후 기

이 연구는 산업자원부 사업(Grant. No. RS-2024-00401483)의 결과물입니다.

References

(1) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd Edition, Research Studies Press, Baldock, United Kingdom.

(2) Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M., 1997, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press, Taunton, United Kingdom.

(3) Seo, Y. J., Lee, C. D., Ahn, H. D. and Kim, C. J., 2022, Study on Design of Vertical Column Sectional Profile of Electronic Equipment Rack for Naval Ship,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 236~242.

(4) Seo, Y. J., Lee, C. D., Ahn, H. D. and Kim, C. J., 2022, Verification Method of Naval Ship's Electronic Equipment Rack Using Shock and Vibration Fatigue Test, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 571~579.

(5) Lee, S. G., Paek, S., Lee, B. U., Jeong, H. Y. and Kim, C. J., 2026, Experimental Study on the Validity of a Q-factor Based Resonance Selection Criterion in Type-approval Vibration Tests for Shipboard Equipment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 74~82.

(6) Verboven, P., 2002, Frequency Domain System Identification for Modal Analysis, Doctoral Dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium.

(7) Peeters, B., Auweraer, H., Guillaume, P. and Leuridan, J., 2004, The PolyMAX Frequency-domain Method: A New Standard for Modal Parameter Estimation?, Shock and Vibration, Vol. 11, No. 3~4, pp. 395~409.

(8) Peeters, B., Lowet, G., Auweraer, H. and Leuridan, J., 2004, A New Procedure for Modal Parameter Estimation, Sound and Vibration, Vol. 38, No. 1, pp. 24~29.

(9) Scionti, M. and Lanslots, J. P., 2005, Stabilisation Diagrams: Pole Identification using Fuzzy Clustering Techniques, Advances in Engineering Software, Vol. 36, No. 11~12, pp. 768~779.

(10) Allemang, R. J., 2003, The Modal Assurance Criterion-twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, Vol. 37, No. 8, pp. 14~23.

(11) Richardson, M. H. and Formenti, D. L., 1982, Parameter Estimation from Frequency Response Measurements Using Rational Fraction Polynomials, Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference, FL, United States, pp. 167~181.

(12) Adams, R. D. and Bacon, D. G. C., 1973, Effect of Fibre Orientation and Laminate Geometry on the Dynamic Properties of CFRP, Journal of Composite Materials, Vol. 7, No. 4, pp. 402~428.

(13) Gibson, R. F., 2000, Modal Vibration Response Measurements for Characterization of Composite Materials and Structures, Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 15, pp. 2769~2780.

(14) Ni, R. G. and Adams, R. D., 1984, The Damping and Dynamic Moduli of Symmetric Laminated Composite Beams-theoretical and Experimental Results, Journal of Composite Materials, Vol. 18, No. 2, pp. 104~121.

(15) Yin, H. P., 2008, A New Theoretical Basis for the Bandwidth Method and Optimal Power Ratios for the Damping Estimation, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, No. 8, pp. 1869~1881.

(16) Suzuki, H., Nakazawa, S., Ono, T. and Kido, K., 2001, Curve Fitting of Frequency Response Functions by Use of Pole-zero Models for the Loss Factor Measurement, Acoustical Science and Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 344~350.

(17) Topaloglu, N. and Karadag, C. V., 2022, A Novel Amplitude-FRF Based SDOF Resonator Parameter Extraction Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 517, 116551.

(18) Inman, D. J., 2014, Engineering Vibration, 4th Edition, Pearson, NJ, United States.

(19) Wang, J. T., Jin, F. and Zhang, C. H., 2012, Estimation Error of the Half-power Bandwidth Method in Identifying Damping for Multi-DOF Systems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 39, pp. 138~142.

(20) Chung, S. and Kim, C. J., 2024, Evaluation of the Modal Parameters of a Unidirectional Carbon-based Composite Structure Using the Influential Factor of Static Loading, Materials, Vol. 17, No. 13, 3209.