



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0140619
(43) 공개일자 2023년10월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01N 29/04 (2006.01) G01N 29/07 (2006.01)
G01N 29/11 (2006.01) G01N 29/12 (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01) G01N 3/40 (2006.01)
G06F 17/10 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01N 29/045 (2013.01)
G01N 29/07 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2022-0038500

(22) 출원일자 2022년03월29일

심사청구일자 2022년03월29일

(71) 출원인

부경대학교 산학협력단

부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)

(72) 발명자

김찬중

부산광역시 연제구 아시아드대로28번길 9, 106동 1204호(거제동, 대우아파트)

(74) 대리인

남건필, 박종수, 정지향, 차상윤

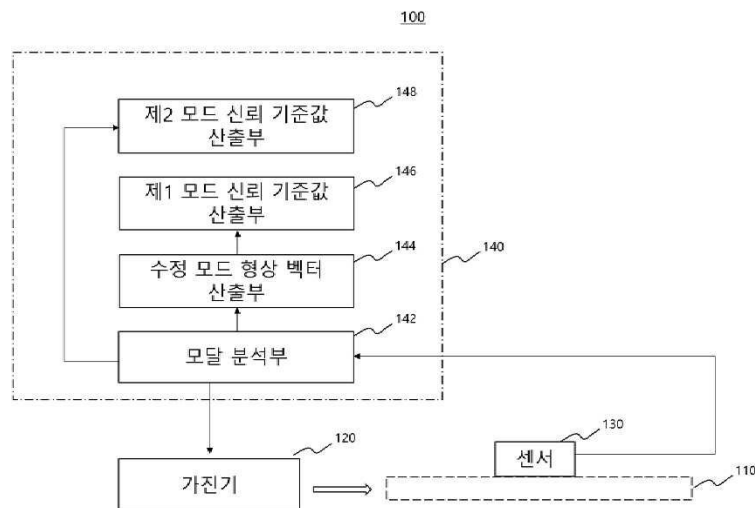
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치

(57) 요약

본 발명은 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치에 관한 것으로, 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법은 단일 방향성을 갖는 소재 시편의 일측에 기설정된 패턴의 물리적 힘을 가진하는 단계, 상기 시편의 적어도 하나 이상의 감지 위치에서 상기 물리적 힘에 의해 생성된 진동 신호를 감지하는 단계, 상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 해당 측정 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 상기 시편에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출하는 단계, 상기 시편의 구조 중심을 지나는 법선(Normal line)과 감지 위치 사이의 거리를 기초로 상기 산출된 모드 형상 벡터를 보정하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계 및 상기 수정 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC: Modal Assurance Criterion)을 산출하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 29/11 (2013.01)
G01N 29/12 (2013.01)
G01N 29/4409 (2013.01)
G01N 29/4472 (2013.01)
G01N 3/405 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
G01N 2291/011 (2013.01)
G01N 2291/014 (2013.01)
G01N 2291/0231 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1425145819
과제번호	S2969570
부처명	중소벤처기업부
과제관리(전문)기관명	중소기업기술정보진흥원
연구사업명	중소기업기술혁신개발(R&D)
연구과제명	빅데이터 기반 스마트제조라인을 적용한 전기차 및 하이브리드 차동장치용 크라운
월세트 기어 기술개발	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	세일단조(주)
연구기간	2021.11.30 ~ 2022.11.29

명세서

청구범위

청구항 1

단일 방향성을 갖는 소재 시편의 일측에 기설정된 패턴의 물리적 힘을 가지는 단계;

상기 시편의 적어도 하나 이상의 감지 위치에서 상기 물리적 힘에 의해 생성된 진동 신호를 감지하는 단계;

상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 해당 측정 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 상기 시편에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출하는 단계;

상기 시편의 구조 중심을 지나는 법선(Normal line)과 감지 위치 사이의 거리를 기초로 상기 산출된 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계; 및

상기 수정 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC: Modal Assurance Criterion)을 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 시편은

단일 각도(θ)로 구조 강성 보강된 단방향 탄소 기반 복합체(Unidirectional Carbon-based Composite Structure, UCBC)인 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 시편은

0도, 30도, 45도, 60도 및 90도 가운데 하나의 각도(θ)로 구조 강성 보강이 된 단방향 탄소 섬유 기반 복합체(UCBC)인 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 주파수 응답을 모달 분석하는 단계는

상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 하기 수학적 식 1을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

[수학적 식 1]

$$H_{mn}^i(\omega, \theta) = \frac{r_{mn}^i}{\left(\omega_{n,i}(\theta)\right)^2 - \omega^2 + 2\omega\omega_{n,i}(\theta)\xi_{n,i}(\theta)j}$$

여기에서, $\omega_{n,i}$ 는 i 차 모드의 공진 주파수(resonance frequency), ξ_i 는 i 차 모드의 모달 감쇠비(modal damping ratio), i 는 자연수, θ 는 각도, ω 는 주파수, r_{mn}^i 은 i 차 모드의 잔차(residual), j 는 허수(imaginary) 유닛

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계는

상기 적어도 하나 이상의 감지 위치와 상기 법선(Normal line)과의 거리를 기초로 하기 수학식 2의 거리 벡터를 산출하는 단계; 및

하기 수학식 3을 이용하여 정규화된 거리 벡터를 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

[수학식 2]

$$d_z(\theta) = \frac{|\cot(\theta)z_x - z_y|}{\sqrt{(\cot(\theta))^2 + 1}}$$

$$D(\theta) = [d_1(\theta) \ d_2(\theta) \ \dots \ d_{N-1}(\theta) \ d_N(\theta)]$$

여기에서, $Z(z_x, z_y)$ 는 감지 위치의 좌표, d_z 는 Normal line과 감지 위치 Z 사이의 거리, $D(\theta)$ 는 거리 벡터

[수학식 3]

$$\hat{W}(\theta) = \frac{D(\theta)}{\max(D(\theta))}$$

여기에서, $W(\theta)$ 는 정규화된 거리 벡터

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계는

상기 정규화된 거리 벡터를 기초로 하기 수학식 4를 이용하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

[수학식 4]

$$\varphi_j^m = \left((\varphi_j)^T \cdot \text{diag}(\hat{W}) \right)^T$$

여기에서, $(\varphi_j)^T$ 는 모드 형상 벡터 φ_j 에 대한 전치(transpose) 벡터, $\text{diag}(A)$ 는 A 행렬의 대각 행렬(diagonal matrix)

청구항 7

제6항에 있어서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계는

하기 수학식 5를 이용하여 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

[수학식 5]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i^m)^T (\varphi_j^m)^*|^2}{((\varphi_i^m)^T (\varphi_i^m)^*) ((\varphi_j^m)^T (\varphi_j^m)^*)}$$

여기에서, $(\varphi_i^m)^T$ 는 i번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i^m)^*$ 는 i번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j^m)^T$, $(\varphi_j^m)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j^m 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

청구항 8

제7항에 있어서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계는

상기 시편의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 주파수 응답을 모달 분석하여 산출된 모드 형상 벡터를 기초로 하기 수학식 6을 이용하여 상기 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 더 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

[수학식 6]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i)^T (\varphi_j)^*|^2}{((\varphi_i)^T (\varphi_i)^*) ((\varphi_j)^T (\varphi_j)^*)}$$

여기에서, $(\varphi_i)^T$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i)^*$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j)^T$, $(\varphi_j)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

청구항 10

제9항에 있어서, 상기 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계는

상기 시편의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법.

청구항 11

제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 단일 방향성을 갖는 소재 시편의 일측에 물리적 힘을 가하는 가진기;

적어도 하나 이상의 감지 위치에서 상기 물리적 힘에 의해 상기 시편에 생성된 진동 신호를 측정하는 센서;

상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 해당 측정 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 상기 시편에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출하는 모달 분석부;

상기 모달 분석부에서 산출된 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 수정 모드 형상 벡터 산출부; 및

상기 산출된 수정 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC: Modal Assurance Criterion)을 산출하는 제1 모드 신뢰 기준값 산출부를 포함하되,

상기 수정 모드 형상 벡터 산출부는 상기 시편의 구조 중심을 지나는 법선(Normal line)과 상기 감지 위치 사이의 거리를 기초로 상기 모달 분석부에서 산출된 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 제1 모드 신뢰 기준값 산출부는

하기 수학식 7을 이용하여 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치.

[수학식 7]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i^m)^T (\varphi_j^m)^*|^2}{((\varphi_i^m)^T (\varphi_i^m)^*) ((\varphi_j^m)^T (\varphi_j^m)^*)}$$

여기에서, $(\varphi_i^m)^T$ 는 i번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i^m)^*$ 는 i번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j^m)^T$, $(\varphi_j^m)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j^m 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

청구항 13

제11항에 있어서,

상기 모달 분석부에서 산출된 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 제2 모드 신뢰 기준값 산출부를 더 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 제2 모드 신뢰 기준값 산출부는

하기 수학식 8을 이용하여 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치.

[수학식 8]

$$MAC(i,j) = \frac{|(\varphi_i)^T(\varphi_j)^*|^2}{((\varphi_i)^T(\varphi_i)^*)((\varphi_j)^T(\varphi_j)^*)}$$

여기에서, $(\varphi_i)^T$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i)^*$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j)^T$, $(\varphi_j)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 특정한 방향으로 구조 강성이 보강된 소재에 대해 모달 파라미터의 변화를 관찰할 수 있는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 복합 재료 소재는 종류가 다른 재료를 결합한 소재로, 단독 재료 소재에서는 얻을 수 없는 특성을 가지는 소재이다. 한 가지 재료로 이루어진 소재와 달리 복합 재료 소재는 미세구조가 일정하지 않을 수 있고, 연속적이지도 않으며 상(phase)이 두 가지 이상인 다상(multiphase)인 경우가 많다. 복합 재료 소재는 크게 입자 강화 재료 소재, 섬유 강화 재료 소재 및 구조 복합 재료 소재로 나뉜다.

[0003] 복합 재료 소재는 단독 재료 소재에 비하여 물리적 또는 화학적으로 강화된 특성을 가지며, 만들어지는 재료에 따라 가볍고 튼튼한 복합 재료 소재가 만들어 질 수 있다. 그러나, 복합 재료 소재의 경우, 소재의 구조(structure)나 재료(material)의 종류에 따라 물리적 특성이 크게 영향을 받는다.

[0004] 탄소 기반 복합 소재(CBC material, Carbon Based Composite material)는 높은 강성과 감쇠 품질로 인해 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 예를 들어, 탄소 섬유 강화 소재(Carbon Fiber Reinforced Material)는 가볍고 튼튼하여 항공우주분야나 자동차 분야와 같이 소재의 경량화가 필요한 분야에 활용되고 있다.

[0005] 그러나, 탄소 섬유를 이용한 탄소 기반 복합 소재의 경우, 탄소 섬유의 방향(orientation)에 따라 복합 재료의 구조가 변하기 때문에 해당 복합 재료의 구조적 강성이나 감쇠 품질은 탄소 섬유에 지배적인 영향을 받는다. 예를 들어, 탄소 섬유 강화 소재의 경우 탄소 섬유에 따라 이방성을 가진 재료의 특성으로 인해 소재의 동적 특성이 달라지기 때문에 공진점(Resonance Frequency)과 모드 형상(Mode Shape)에 변화가 생기게 된다. 또한, 동일 형상의 복합 구조이지만 다른 방향으로 구조 강성 보강이 된 경우들의 경우에도 강성 보강 방향에 영향을 받아 모드 형상에 변화가 발생한다. 종래 기술의 경우, 구조 강성의 보강 여부나 방향에 따라 모달 파라미터 정보들이 변화하는 것은 알 수 있으나, 관심 모드 차수에 해당하는 파라미터가 어떻게 변화하는지를 구체적으로 살펴볼 수 없는 문제가 있었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 일본 공개특허공보 JP2015-032295(2015.02.16)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 본 발명은 특정한 방향으로 구조 강성이 보강된 소재에 대해 모달 파라미터의 변화를 관찰할 수 있는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치를 제공한다.
- [0008] 본 발명은 구조 강성 보강에 의해 발생하는 각 모드의 형상 정보 변화를 최소화하고 모드 신뢰 기준값(MAC, Modal Assurance Criterion) 값을 이용하여 각 모드의 변화를 효과적으로 살펴볼 수 있는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치를 제공한다.
- [0009] 본 발명은 시편을 제작하여 시험을 하지 않는 상태에서도 특정 방향으로 구조 강성 보강이 될 경우의 동적 특성을 예측할 수 있는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치를 제공한다.

과제의 해결 수단

- [0010] 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법은 단일 방향성을 갖는 소재 시편의 일측에 기 설정된 패턴의 물리적 힘을 가진하는 단계, 상기 시편의 적어도 하나 이상의 감지 위치에서 상기 물리적 힘에 의해 생성된 진동 신호를 감지하는 단계, 상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 해당 측정 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 상기 시편에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출하는 단계, 상기 시편의 구조 중심을 지나는 법선(Normal line)과 감지 위치 사이의 거리를 기초로 상기 산출된 모드 형상 벡터를 보정하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계 및 상기 수정 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC: Modal Assurance Criterion)을 산출하는 단계를 포함한다.
- [0011] 일 실시예에서, 상기 시편은 단일 각도(θ)로 구조 강성 보강된 단방향 탄소 기반 복합체(Unidirectional Carbon-based Composite Structure, UCBC)일 수 있다.
- [0012] 일 실시예에서, 상기 시편은 0도, 30도, 45도, 60도 및 90도 가운데 하나의 각도(θ)로 구조 강성 보강이 된 단방향 탄소 섬유 기반 복합체(UCBC)일 수 있다.
- [0013] 일 실시예에서, 상기 주파수 응답을 모달 분석하는 단계는 상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 하기 수학식 1을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0014] [수학식 1]

$$H_{mn}^i(\omega, \theta) = \frac{r_{mn}^i}{(\omega_{n,i}(\theta))^2 - \omega^2 + 2\omega\omega_{n,i}(\theta)\xi_{n,i}(\theta)j}$$

- [0015]

- [0016] 여기에서, $\omega_{n,i}$ 는 i차 모드의 공진 주파수(resonance frequency), ξ_i 는 i차 모드의 모달 감쇠비(modal damping ratio), i는 자연수, θ 는 각도, ω 는 주파수, r_{mn}^i 은 i차 모드의 잔차(residual), j는 허수(imaginary) 유닛

- [0017] 일 실시예에서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계는 상기 적어도 하나 이상의 감지 위치와 상기 법선(Normal line)과의 거리를 기초로 하기 수학식 2의 거리 벡터를 산출하는 단계 및 하기 수학식 3을 이용하여 정규화된 거리 벡터를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0018] [수학식 2]

$$d_z(\theta) = \frac{|cot(\theta)z_x - z_y|}{\sqrt{(cot(\theta))^2 + 1}}$$

- [0019]

$$D(\theta) = [d_1(\theta) \ d_2(\theta) \ \dots \ d_{N-1}(\theta) \ d_N(\theta)]$$

[0020]

[0021] 여기에서, $Z(z_x, z_y)$ 는 감지 위치의 좌표, d_z 는 Normal line과 감지 위치 Z 사이의 거리, $D(\theta)$ 는 거리 벡터

[0022] [수학식 3]

$$\hat{W}(\theta) = \frac{D(\theta)}{\max(D(\theta))}$$

[0023]

[0024] 여기에서, $W(\theta)$ 는 정규화된 거리 벡터

[0025] 일 실시예에서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계는 상기 정규화된 거리 벡터를 기초로 하기 수학식 4를 이용하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0026] [수학식 4]

$$\varphi_j^m = \left((\varphi_j)^T \cdot \text{diag}(\hat{W}) \right)^T$$

[0027]

[0028] 여기에서, $(\varphi_j)^T$ 는 모드 형상 벡터 φ_j 에 대한 전치(transpose) 벡터, $\text{diag}(A)$ 는 A 행렬의 대각 행렬(diagonal matrix)

[0029] 일 실시예에서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계는 하기 수학식 5를 이용하여 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0030] [수학식 5]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i^m)^T (\varphi_j^m)^*|^2}{((\varphi_i^m)^T (\varphi_i^m)^*) ((\varphi_j^m)^T (\varphi_j^m)^*)}$$

[0031]

[0032] 여기에서, $(\varphi_i^m)^T$ 는 i 번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i^m)^*$ 는 i 번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j^m)^T$, $(\varphi_j^m)^*$ 는 각각 j 번째 모드 형상 φ_j^m 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

[0033] 일 실시예에서, 상기 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계는 상기 시편의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제1 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0034] 일 실시예에서, 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법은 상기 주파수 응답을 모달 분석하여 산출된 모드 형상 벡터를 기초로 하기 수학식 6을 이용하여 상기 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0035] [수학식 6]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i)^T (\varphi_j)^*|^2}{((\varphi_i)^T (\varphi_i)^*) ((\varphi_j)^T (\varphi_j)^*)}$$

[0036]

[0037] 여기에서, $(\varphi_i)^T$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i)^*$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j)^T$, $(\varphi_j)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

[0038] 일 실시예에서, 상기 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계는 상기 시편의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0039] 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치는 제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 단일 방향성을 갖는 소재 시편의 일측에 물리적 힘을 가하는 가진기, 적어도 하나 이상의 감지 위치에서 상기 물리적 힘에 의해 상기 시편에 생성된 진동 신호를 측정하는 센서, 상기 시편에 가해진 물리적 힘과 상기 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 해당 측정 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 상기 시편에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출하는 모달 분석부, 상기 모달 분석부에서 산출된 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 수정 모드 형상 벡터 산출부 및 상기 산출된 수정 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC: Modal Assurance Criterion)을 산출하는 제1 모드 신뢰 기준값 산출부를 포함하되, 상기 수정 모드 형상 벡터 산출부는 상기 시편의 구조 중심을 지나는 법선(Normal line)과 상기 감지 위치 사이의 거리를 기초로 상기 모달 분석부에서 산출된 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출한다.

[0040] 일 실시예에서, 상기 제1 모드 신뢰 기준값 산출부는 하기 수학식 7을 이용하여 제1 모드 신뢰 기준값을 산출할 수 있다.

[0041] [수학식 7]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i^m)^T (\varphi_j^m)^*|^2}{((\varphi_i^m)^T (\varphi_i^m)^*) ((\varphi_j^m)^T (\varphi_j^m)^*)}$$

[0042]

[0043] 여기에서, $(\varphi_i^m)^T$ 는 i번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i^m)^*$ 는 i번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j^m)^T$, $(\varphi_j^m)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j^m 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

[0044] 일 실시예에서, 상기 모달 분석부에서 산출된 모드 형상 벡터를 기초로 상기 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출하는 제2 모드 신뢰 기준값 산출부를 더 포함할 수 있다.

[0045] 일 실시예에서, 상기 제2 모드 신뢰 기준값 산출부는 하기 수학식 8을 이용하여 제2 모드 신뢰 기준값을 산출할 수 있다.

[0046] [수학식 8]

$$MAC(i,j) = \frac{|(\varphi_i)^T(\varphi_j)^*|^2}{((\varphi_i)^T(\varphi_i)^*)((\varphi_j)^T(\varphi_j)^*)}$$

[0047]

[0048] 여기에서, $(\varphi_i)^T$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i)^*$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j)^T$, $(\varphi_j)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j 의 전치 행렬 및 켤레 행렬

발명의 효과

[0049] 이상에서 설명한 바와 같이, 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치는 특정한 방향으로 구조 강성이 보강된 소재에 대해 모달 파라미터의 변화를 관찰할 수 있다.

[0050] 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치는 구조 강성 보강에 의해 발생하는 각 모드의 형상 정보 변화를 최소화하고 모드 신뢰 기준값(MAC, Modal Assurance Criterion) 값을 이용하여 각 모드의 변화를 효과적으로 살펴볼 수 있다.

[0051] 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치는 시편을 제작하여 시험을 하지 않는 상태에서도 특정 방향으로 구조 강성 보강이 될 경우의 동적 특성을 예측할 수 있다.

[0052] 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치에 의하면 주어진 복합 구조물의 특정 방향에 대한 구조 강성 보강이 모드 형상에 미치는 영향이 선형성을 보장받을 수 있는 경우, 다수의 방향으로 구조 강성이 보강된 복합 구조물에 대한 동적 특성을 사전에 예측하는데도 효과적일 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0053] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치의 구성을 나타내는 구성도
- 도 2는 복수의 센서를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치의 구성을 예시적으로 나타낸 구성도
- 도 3은 탄소섬유 방향이 θ 각도로 배열되어, 해당 각도(θ 로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 섬유 기반 복합체(Unidirectional Carbon-based Composite Structure, UCBC)의 일 예를 나타내는 도면
- 도 4는 단일 방향성을 갖는 소재 시편 및 센서 부착 위치의 일 예를 나타내는 도면
- 도 5는 복수의 센서가 부착된 소재 시편의 일 예를 나타내는 도면
- 도 6은 시편에 대해 산출된 모드 형상 벡터의 일 예를 나타내는 도면
- 도 7은 탄소섬유 방향이 θ 인 UCBC 시편에서 측정위치 $Z(z_x, z_y)$ 와 Normal line 사이의 거리를 나타내는 도면
- 도 8은 UCBC 시편에 대한 Normal line과 복수의 측정 위치 사이의 거리를 설명하는 도면
- 도 9는 모달 분석을 통해 산출된 수정 전 모드 형상 벡터와 수정 후 모드 형상 벡터를 나타내는 도면
- 도 10은 등방성(isotropy) 시편에 대한 모달 파라미터를 나타내는 표
- 도 11은 UCBC 시편에 대해 산출된 모달 파라미터와 모드 신뢰 기준값(MAC)을 나타내는 표
- 도 12는 UCBC 시편에 대해 수정 전 모드 형상 벡터의 모드 신뢰 기준값(MAC)과 수정 모드 형상 벡터의 모드 신뢰 기준값(MAC)을 나타내는 표
- 도 13은 UCBC 시편의 구조 강성 변화를 나타내는 도면
- 도 14는 UCBC 시편의 점성 감쇠 계수 변화를 나타내는 도면

도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법을 설명하는 흐름도

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0054] 이하, 본 발명에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치를 실시하기 위한 구체적인 내용을 설명하면 다음과 같다.
- [0056] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치의 구성을 나타내는 구성도이다.
- [0057] 도 1을 참조하면, 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치(100)는 가진기(120), 센서(130) 및 모드 변화 분석부(140)를 포함하고, 모드 변화 분석부(140)는 모달 분석부(142), 수정 모드 형상 벡터 산출부(144), 제 1 모드 신뢰 기준값 산출부(146) 및 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)를 포함할 수 있다.
- [0058] 탄소 기반 복합 소재(CBC material, Carbon Based Composite material)가 단일 방향으로 구조 강성이 보강되어 해당 방향으로 큰 구조 강성을 가지는 경우, 해당 소재는 보강에 의해 모드 형상이 변화할 수 있다. 모드 형상이 변화되는 것을 보장하여 모드 형상 변화를 최소화시킬 수 있는 경우, 모드 형상 간의 연관성을 하나의 값으로 보여주는 모드 신뢰 기준값(MAC, Modal Assurance Criterion)을 이용하여 특정 방향으로 구조 강성이 보강된 경우에 대해 모달 파라미터(공진점(Resonance Frequency), 감쇠 계수(Modal Damping Coefficient))의 변화를 관찰할 수 있다.
- [0059] 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치(100)는 단일 방향으로 구조 강성이 보강된 탄소 기반 복합 소재에 대해 모드의 변화를 분석할 수 있다. 예를 들어, 모드 변화 분석 장치(100)는 모드 형상 벡터를 보정하여 구조 강성 보강에 의해 변화된 모드 형상을 보정하고, 보정된 모드 형상 벡터를 이용하여 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출할 수 있다.
- [0060] 가진기(120)는 제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 시편(110)의 일측에 물리적 힘을 가한다. 일 실시예에서, 가진기(120)는 시편(110)의 기 설정된 위치에 물리적 힘을 가할 수 있다.
- [0061] 시편(110)은 분석의 대상이 되는 소재로 단일 방향성을 갖는 소재에 해당할 수 있다. 일 실시예에서, 시편(110)으로 단일 각도(θ)로 구조 강성 보강된 단방향 탄소 기반 복합체(Unidirectional Carbon-based Composite Structure, UCBC)에 해당할 수 있다.
- [0062] 가진기(120)는 자동으로 시편(110)에 임팩트를 인가할 수 있는 고정식 임팩트 장치를 활용할 수 있다. 일 실시예에서, 가진기(120)는 임팩트 해머(impact hammer) 또는 전기 진동기(electrodynamic shaker) 등을 포함할 수 있다. 이하에서는, 설명의 편의를 위해, 임팩트 해머를 가진기로 사용하는 경우를 가정하여 설명하기로 한다. 임팩트 해머는 시편(110)에 물리적 손상을 일으키지도 않고, 시험을 위한 사전 가공이 필요하지 않으며, 넓은 주파수에 걸쳐 시편(110)에 임팩트를 인가할 수 있다. 임팩트 해머의 경우, 실제 가진이 되는 부분(임팩트 부분)에 팁(tip)이 구비될 수 있다.
- [0063] 센서(130)는 시편(110)의 기 설정된 위치에 접하며, 가진기(120)에 의해 가해진 물리적 힘에 의해 시편(110)에서 생성된 신호를 수집한다. 일 실시예에서, 시편(110)에는 적어도 하나 이상의 감지 위치에 센서(130)가 배치될 수 있다. 센서(130)의 종류는 수집하고자 하는 물리적 신호의 종류에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, 가속 진동(acceleration vibration)을 측정하는 경우 가속도 센서가 사용될 수 있고, 표면 속도(surface velocity)를 측정하는 경우 레이저 센서가 사용될 수 있으며, 변위(displacement)를 측정하는 경우 사진계측(photogrammetry)이나 스트링 팻(string pots)이 사용될 수 있다. 이하에서는, 설명의 편의를 위해, 센서(130)로 가속도 센서가 사용되어 진동 신호를 수집하는 경우를 가정하여 설명하기로 한다.
- [0064] 모드 변화 분석부(140)는 시편(110)에 가해진 물리적 힘과 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 주파수 응답을 산출하여 모달 분석하고, 시편(110)에 대한 모드 형상 벡터를 산출한다. 모드 변화 분석부(140)는 산출된 모드 형상 벡터를 보정하고, 보정된 모드 형상 벡터를 이용하여 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출할 수 있다.
- [0065] 모달 분석부(142), 수정 모드 형상 벡터 산출부(144), 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146) 및 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)를 포함한다.
- [0066] 모달 분석부(142)는 시편(110)에 가해진 물리적 힘과 시편(110)에 설치된 센서(130)를 통해 측정된 진동 신호를

기초로 해당 수집 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석한다. 일 실시예에서, 모달 분석부(142)는 모달 분석을 통해 시편(110)의 모달 파라미터(N개의 모드(모드 형상), 각 모드별 공진점 및 각 공진점별 감쇠 계수를 포함)를 획득할 수 있다.

- [0067] 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터(Mode Shape Vector)를 보상하여, 모드 형상 변화가 보상된 수정 모드 형상 벡터(Modified Mode Shape Vector)를 산출한다.
- [0068] 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146)는 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)에서 산출된 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 시편(110)에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출한다. 일 실시예에서, 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146)는 시편(110)의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여, 시편(110)의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제1 모드 신뢰 기준값을 산출할 수 있다.
- [0069] 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터를 이용하여 시편(110)에 대한 제2 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출한다. 일 실시예에서, 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)는 시편(110)의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 시편(110)의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제2 모드 신뢰 기준값을 산출할 수 있다.
- [0070] 일 실시예에서, 모드 변화 분석부(140)는 산출된 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)과 제2 모드 신뢰 기준값(MAC)을 화면에 출력할 수 있다. 일 실시예에서, 모드 변화 분석부(140)는 산출된 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)과 제2 모드 신뢰 기준값(MAC)을 기 설정된 기준에 따라 비교하여, 비교 결과를 화면에 출력할 수도 있다.
- [0072] 도 2는 복수의 센서를 포함하는 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치의 구성을 예시적으로 나타낸 구성도이다. 이하에서는, 설명의 편의를 위해 도 1과 차이가 있는 부분을 중심으로 설명하기로 한다.
- [0073] 도 2를 참조하면, 시편(110)의 일 측에는 복수의 센서(130a, 130b, 130c, 130d, ...)가 위치할 수 있다. 복수의 센서(130a, 130b, 130c, 130d, ...)를 사용하여 시편(110)의 진동을 수집하는 구성 외에 나머지 구성은 도 1과 동일하다. 센서의 수와 위치는 구현 예에 따라 달라질 수 있다.
- [0074] 복수의 센서(130a, 130b, 130c, 130d, ...)의 위치는 기 설정된 위치일 수도 있고, 사용자에게 의해 정해진 위치일 수도 있다. 복수의 센서(130a, 130b, 130c, 130d, ...)들은 해당 위치에서 시편(110)의 진동을 수집하여 모드 변화 분석부(140)로 전송한다.
- [0075] 이하에서는, 도 1 내지 도 13을 참조하여, 모드 변화 분석 장치(100)를 통해 단일 방향으로 구조 강성이 보강된 탄소 기반 복합 소재에 대해 모드의 변화를 분석하는 과정을 구체적인 예시를 들어 설명하기로 한다.
- [0077] 가진기(120)는 제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 시편(110)의 일측에 물리적 힘을 가한다. 예를 들어, 가진기(120)는 시편(110)의 기 설정된 위치에 물리적 힘을 가할 수 있다. 센서(130)는 시편(110)의 기 설정된 위치에 접하며, 가진기(120)에 의해 가해진 물리적 힘에 의해 시편(110)에서 생성된 신호를 수집한다. 일 실시예에서, 시편(110)은 기준 선(Reference Line)을 기준으로 θ 각도로 탄소섬유(carbon fiber)가 배열되어, 해당 각도(θ 로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 기반 복합체(UCBC)일 수 있다. 일 실시예에서, 시편(110)은 0도, 30도, 45도, 60도 및 90도 가운데 하나의 각도(θ 로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 기반 복합체일 수 있다.
- [0078] 도 3은 탄소섬유 방향이 θ 각도로 배열되어, 해당 각도(θ 로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 섬유 기반 복합체의 일 예를 나타내는 도면이다.
- [0079] 도 3을 참조하면, 단방향 탄소 섬유 기반 복합체는 기준 선(Reference Line)을 기준으로 θ 각도로 탄소섬유가 배열되어 있는 것을 확인할 수 있다. 일 실시예에서, 기준 선은 Y축을 기준으로 시편의 중심점을 지나는 선으로 정의될 수 있다.
- [0080] 일 실시예에서, 단방향 탄소 섬유 기반 복합체는 θ 각도로 탄소섬유가 배열된 80 mm (W) $\times$ 150 mm (L) $\times$ 3 mm (H) 크기의 사각형으로 제작될 수 있다. 일 실시예에서, 단방향 탄소 기반 복합체는 USN 250A 소재(SK Chemical)를 동일 방향으로 12층 적층한 후 오토클레이브(autoclave curing) 방식으로 제작하였다. 제작된 12층의 단방향 탄소 기반 복합체는 탄소섬유의 방향이 0도, 30도, 45도, 60도 또는 90도가 되도록 잘라질 수 있으며, 잘라진 재료는 시편(110)으로 사용될 수 있다.

[0082] 도 4는 단일 방향성을 갖는 소재 시편 및 센서 부착 위치의 일 예를 나타내는 도면이고, 도 5는 복수의 센서가 부착된 소재 시편의 일 예를 나타내는 도면이다.

[0083] 도 4와 도 5를 참조하면, 시편(110)의 일측 10군데 위치(#1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8, #9, #10)에 가속도 센서(130)가 부착될 수 있다. 가속도 센서(130)의 개수와 배치 위치는 구현 예에 따라 달라질 수 있다. 일 실시예에서, 센서는 인접하는 센서와 사이가 일정 간격으로 이격되어 시편(110)의 일측에 균일하게 배치될 수 있다. 일 실시예에서, 모드 변화 분석에 사이즈 20 mm (W) × 37.5 mm (L) × 3 mm (H) 사이즈의 시편(110)이 사용될 수 있다.

[0085] 다시 도 1을 참조하면, 가진기(120)는 제어에 의해 #3 위치에 -Z축 방향으로 물리적 힘을 가하고, #1~#10 위치의 센서(130)는 단축(+Z) 방향으로 진동 신호를 수집하여 모드 변화 분석부(140)로 전송한다.

[0086] 모달 분석부(142)는 시편(110)에 가해진 물리적 힘과 센서(130)에 의해 수집된 진동 신호를 기초로 각 감지 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 시편(110)에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출한다. 모달 분석은 진동 문제에 대한 고유 진동수를 해석하는 것을 말한다.

[0087] 일 실시예에서, 시편(110)을 선형시불변(Linear Time-Invariant) 시스템으로 가정하면, 시편(110)의 동적 특성(dynamic behavior)은 모달 파라미터로 표현될 수 있다. 선형시불변 시스템의 n차 자유도 지배 방정식(n-degree-of-freedom governing equation)은 하기 수학적 식 1로 표현될 수 있다.

[0088] [수학적 식 1]

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = [0 \quad \dots \quad 0]^T$$

[0089]

$$X(t) = [x_1(t) \quad \dots \quad x_n(t)]^T.$$

[0090]

[0091] 여기에서, M은 질량(mass) 행렬, C는 감쇠(damping) 행렬, K는 강성(Stiffness) 행렬을 나타내며, $[A]^T$ 는 A행렬의 전치 행렬(transposed matrix)을 나타낸다.

[0092] 시간 도메인(time domain)의 수학적 식 1은 주파수 도메인(frequency domain)의 수학적 식 2로 표현될 수 있다.

[0093] [수학적 식 2]

$$X(t) = \Phi R$$

[0094]

$$\begin{bmatrix} 1 & & \text{zeros} \\ & \ddots & \\ \text{zeros} & & 1 \end{bmatrix} \ddot{R} + \begin{bmatrix} 2\omega_{n,1}\xi_1 & & \text{zeros} \\ & \ddots & \\ \text{zeros} & & 2\omega_{n,N}\xi_N \end{bmatrix} \dot{R} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \text{zeros} \\ & \ddots & \\ \text{zeros} & & \omega_N^2 \end{bmatrix} R = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0095]

$$R = [r_1(t) \quad \dots \quad r_N(t)]^T$$

[0096] 여기에서, $\omega_{n,i}$ 는 i차 모드의 공진 주파수(resonance frequency), ξ_i 는 i차 모드의 모달 감쇠비(modal damping ratio), i는 자연수를 나타낸다.

[0097] φ_i 는 질량이 정규화된 모드 형상 벡터를 나타내며, $\Phi = [\varphi_1 \quad \dots \quad \varphi_n]$ 는 모드 형상 벡터를 포함하는 행렬을 나타낸다.

[0098] i차 모드의 점성 감쇠계수(viscous damping coefficient, c_i)는 하기 수학적 식 3으로 나타낼 수 있으며, i차 모드의 구조 강성(stiffness, k_i)는 하기 수학적 식 4로 나타낼 수 있다.

[0099] [수학식 3]

$$c_i = 2\omega_{n,i}\xi_i$$

[0100]

[0101] [수학식 4]

$$k_i = m_i(\omega_{n,i})^2$$

[0102]

[0103] 여기에서, m_i 는 i 차 모드의 모달 질량(modal mass)을 나타낸다.

[0104] 선형 시스템의 특징으로 인해, 입력지점과 출력지점이 다른 즉, 2지점(m 지점, n 지점) 사이의 i 차 모드의 주파수 응답 함수(FRF, Frequency Response Function)는 하기 수학식 5로 나타낼 수 있다.

[0105] [수학식 5]

$$H_{mn}^i(\omega) = \frac{r_{mn}^i}{(\omega_{n,i})^2 - \omega^2 + 2\omega_{n,i}\omega\xi_{n,i}j}$$

[0106]

[0107] 여기에서, ω 는 주파수, r_{mn}^i 은 i 차 모드의 잔차(residual), j 는 허수(imaginary) 유닛을 나타낸다.

[0108] 공진 주파수(resonance frequency)는 주파수 응답 함수의 nodal point를 제외한 반복되는 첨두 포인트(peak point)에서 측정될 수 있으며, 모달 감쇠 계수는 공진 주파수와 반전력 포인트(half power point)사이의 값을 이용하여 산출될 수 있다. i 차 모드의 모달 감쇠비($\xi_{n,i}$)는 하기 수학식 6을 이용하여 산출될 수 있다.

[0109] [수학식 6]

$$\xi_{n,i} = \frac{\omega_{n,i}}{2|\omega_{n,i}^{(2)} - \omega_{n,i}^{(1)}|}$$

[0110]

[0111] 여기에서, $|a|$ 는 a 의 절대값, $\omega_{n,i}^{(2)}$ 와 $\omega_{n,i}^{(1)}$ 는 공진 주파수 $\omega_{n,i}$ 의 반전력 포인트를 나타낸다.

[0112] 일 실시예에서, 시편(110)이 θ 각도로 탄소섬유가 배열되어, 각도(θ 로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 기반 복합체인 경우, 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 기반 복합체도 선형 시스템으로 가정할 수 있다.

[0113] 단방향 탄소 기반 복합체의 모달 파라미터는 온도, 가진 패턴(impact, random, harmonic) 및 탄소 섬유 방향(orientation)에 영향을 받는다. 온도 조건과 가진 패턴을 동일하게 유지하는 경우, 단방향 탄소 기반 복합체의 모달 파라미터는 탄소 섬유의 방향 즉, 탄소섬유가 배열된 각도(θ)에 영향을 받으며, 모달 파라미터는 각도(θ)의 함수가 될 수 있다.

[0114] 이러한 경우, 각도(θ 로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 기반 복합체에 대한 i 차 모드의 주파수 응답 함수(FRF)는 하기 수학식 7과 같이 나타낼 수 있다.

[0115] [수학식 7]

$$H_{mn}^i(\omega, \theta) = \frac{r_{mn}^i}{(\omega_{n,i}(\theta))^2 - \omega^2 + 2\omega\omega_{n,i}(\theta)\xi_{n,i}(\theta)j}$$

[0116]

[0117] 모달 분석부(142)는 수학식 7의 주파수 응답 함수를 이용하여, 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출한다. 도 6은 실험을 통해 시편에 대해 산출된 모드 형상 벡터의 일 예를 나타내는 도면이다.

[0118] 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터 가운데 서로 다른 2개의 모드 형상 벡터를 이용하여 시편(110)에 대한 제2 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출한다. 예를 들어, 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)는 모달 분석부(142)에서 산출된 i차 모드 형상 벡터(φ_i)와 j차 모드 형상 벡터(φ_j)를 기초로, 하기 수학식 8을 이용하여 제2 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출할 수 있다. 모드 신뢰 기준값(MAC)은 양 모드 형상 벡터 사이의 유사도를 측정할 수 있다.

[0119] [수학식 8]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i)^T (\varphi_j)^*|^2}{((\varphi_i)^T (\varphi_i)^*) ((\varphi_j)^T (\varphi_j)^*)}$$

[0120]

[0121] 여기에서, $(\varphi_i)^T$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i)^*$ 는 i번째 모드 형상 φ_i 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j)^T$, $(\varphi_j)^*$ 는 각각 j번째 모드 형상 φ_j 의 전치 행렬 및 켤레 행렬을 나타낸다.

[0122] 일 실시예에서, 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 상기 시편의 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제2 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출할 수 있다. 이러한 경우, 상기 수학식 8에서 φ_i 는 모달 분석부(142)에서 산출된 i차 모드 형상 벡터, φ_j 는 등방성 소재의 모드 형상 벡터에 해당할 수 있다.

[0123] 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터(Mode Shape Vector)를 보상하여, 모드 형상 변화가 보상된 수정 모드 형상 벡터(Modified Mode Shape Vector)를 산출한다. 일 실시예에서, 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 변화된 모드 형상이 최소화되도록 시편(110)의 구조 중심을 지나는 법선(Normal line)과 감지 위치(센서의 위치) 사이의 거리를 기초로 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출한다. 법선(Normal line)은 시편(110)의 기준 선을 기준으로 θ 각도로 기울어진 선으로 시편(110)의 구조 중심을 지나는 선으로 정의될 수 있다.

[0125] 도 7은 탄소섬유 방향이 θ 인 UCBC 시편에서 측정위치 $Z(z_x, z_y)$ 와 법선(Normal line) 사이의 거리를 설명하는 도면이다.

[0126] 시편(110)의 구조 중심을 원점으로 지나는 종선을 X축선, 횡선을 Y축선으로 정의하는 경우, 법선(Normal line)은 $Y = \cot(\theta)X$ 로 나타낼 수 있다. 시편(110) 상의 한 점의 위치 좌표가 (z_x, z_y) 이고, 해당 위치 (z_x, z_y) 에서 법선까지의 수직 거리를 d_z 라고 할 때, d_z 는 하기 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

[0127] [수학식 9]

$$d_z(\theta) = \frac{|\cot(\theta)z_x - z_y|}{\sqrt{(\cot(\theta))^2 + 1}}$$

[0128]

[0130] 도 8은 UCBC 시편에 대한 Normal line과 복수의 감지 위치 사이의 거리를 설명하는 도면이다.

[0131] 일 실시예에서, 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 데 각 감지 위치에서 법선까지의 거리를 이용할 수 있다. 도 8을 참조하면, 도 8은 탄소섬유 방향이 θ 인 UCBC 시편(110)에 10개의 센서(130)가 배치되어 감지 위치가 10개인 경우, 각 감지 위치($\#1, \#2, \#3, \#4, \#5, \#6, \#7, \#8, \#9, \#10$)에서 법선까지

의 수직 거리($d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9, d_{10}$)를 나타낸다.

[0132] 하기 수학식 10은 시편(110) 상에 센서(130)가 배치된 각 감지 위치에서 법선까지의 수직 거리를 산출하여 나타낸 것으로 거리 벡터로 정의될 수 있다.

[0133] [수학식 10]

$$D(\theta) = [d_1(\theta) \ d_2(\theta) \ \dots \ d_{N-1}(\theta) \ d_N(\theta)]$$

[0134]

[0135] 여기에서, N은 감지 위치의 개수를 나타낸다.

[0136] 일 실시예에서, 센서(130)가 배치된 각 감지 위치에서 법선까지의 수직 거리는 사용자에게 의해 미리 산출되어 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)에 입력될 수 있다. 다른 실시예에서, 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 구조 강성 보강 각도(θ), 센서의 개수 및 센서의 위치 정보를 입력받아 각 감지 위치에서 법선까지의 수직 거리를 자동으로 산출할 수도 있다. 다른 실시예에서, 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 촬영된 시편(110) 이미지를 분석하여 탄소 섬유 배열 각도(θ), 시편의 중심점, 센서의 개수 및 센서의 위치 정보를 분석하고, 각 감지 위치에서 법선까지의 수직 거리를 자동으로 산출할 수도 있다. 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 산출된 거리를 기초로 수학식 10의 거리 벡터를 산출할 수 있다.

[0137] θ 각도로 구조 강성이 보강된 소재는 모드 형상 벡터에 왜곡(distortion)이 발생하고, 탄소 섬유의 방향(θ)에 따라 구조 강성이 증가한다. 증가한 구조 강성으로 인해 굽은 구조(deflected structure)에서는 곡률 반경(radius of curvature)이 줄어들게 되므로, 다른 각도로 강화된 소재의 모드 형상 벡터와 비교하기 위해서는 모드 형상 벡터를 수정하여야 한다.

[0138] 하기 수학식 11은 탄소 섬유가 θ 각도 방향으로 배열되어 구조 강성이 보강된 소재에 대한 모드 형상 벡터를 수정하기 위한 수정 윈도우(modification window)이다.

[0139] [수학식 11]

$$\hat{W}(\theta) = \frac{D(\theta)}{\max(D(\theta))}$$

[0140]

[0141] 여기에서, $\max(A)$ 는 A에서 최대값을 나타낸다. 수정 윈도우($\hat{W}(\theta)$)는 각 감지 위치에서 법선까지의 거리를 나타내는 거리 벡터를 최대 거리값으로 나눈 것으로, 정규화된 거리 벡터로 정의될 수 있다.

[0142] 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터를 수정 윈도우($\hat{W}(\theta)$)를 이용하여 보상하고, 수정 모드 형상 벡터를 산출한다. 예를 들어, j차 모드 형상 벡터(φ_j)를 수정 윈도우($\hat{W}(\theta)$)를 이용하여 보상하는 경우, 보상된 수정 모드 형상 벡터(φ_j^m)는 하기 수학식 12와 같이 나타낼 수 있다.

[0143] [수학식 12]

$$\varphi_j^m = \left((\varphi_j)^T \cdot \text{diag}(\hat{W}) \right)^T$$

[0144]

[0145] 여기에서, $\text{diag}(A)$ 는 A행렬의 대각 행렬(diagonal matrix)을 나타낸다.

[0147] 도 9는 모달 분석을 통해 산출된 수정 전 모드 형상 벡터와 수정 후 모드 형상 벡터를 나타내는 도면이다.

[0148] 도 9를 참조하면, d_N 을 최대 거리값으로 가정하는 경우, 수정 후 모드 형상 벡터와 수정 전 모드 형상 벡터를

비교하면, 중심점(x_0)에 가까운 모드 형상 벡터일수록 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 수정 윈도우를 수정 전 모드 형상 벡터에 적용하는 경우, 반대로 수정된 모드 형상 벡터의 곡률 반경(radius of curvature)이 강조되는 결과로 나타난다.

[0150] 다시 도 1을 참조하면, 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146)는 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)에서 산출된 수정 모드 형상 벡터 가운데 서로 다른 2개의 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 시편(110)에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출한다. 예를 들어, 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146)는 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)에서 산출된 i 차 수정 모드 형상 벡터(φ_i^m)와 j 차 수정 모드 형상 벡터(φ_j^m)를 기초로, 하기 수학식 13을 이용하여 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출할 수 있다. 모드 신뢰 기준값(MAC)은 양 수정 모드 형상 벡터 사이의 유사도를 측정할 수 있다.

[0151] [수학식 13]

$$MAC(i, j) = \frac{|(\varphi_i^m)^T (\varphi_j^m)^*|^2}{((\varphi_i^m)^T (\varphi_i^m)^*) ((\varphi_j^m)^T (\varphi_j^m)^*)}$$

[0152]

[0153] 여기에서, $(\varphi_i^m)^T$ 는 i 번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 전치 행렬(transpose matrix), $(\varphi_i^m)^*$ 는 i 번째 수정 모드 형상 φ_i^m 의 켤레 행렬(conjugate matrix)을 나타낸다. 또한, $(\varphi_j^m)^T$, $(\varphi_j^m)^*$ 는 각각 j 번째 모드 형상 φ_j^m 의 전치 행렬 및 켤레 행렬을 나타낸다.

[0154] 일 실시예에서, 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146)는 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)에서 산출된 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여 시편(110)의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터 사이의 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출할 수 있다. 이러한 경우, 상기 수학식 13에서 φ_i^m 는 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)에서 산출된 i 차 수정 모드 형상 벡터, φ_j^m 는 등방성 소재의 모드 형상 벡터에 해당할 수 있다. 단일 방향성을 갖는 소재 시편의 수정 모드 형상 벡터와 등방성 소재의 모드 형상 벡터를 이용하여, 특정 방향으로 강성이 보강된 소재와 강성 보강이 없는 소재 사이의 모드 형상 벡터의 유사성을 모드 신뢰 기준값(MAC) 값을 활용하여 평가할 수 있다.

[0156] 도 10은 등방성(isotropy) 시편에 대한 모달 파라미터를 나타내는 표이고, 도 11은 UCBC 시편에 대해 산출된 모달 파라미터와 모드 신뢰 기준값(MAC)을 나타내는 표이다.

[0157] 도 10은 등방성 시편에 대해 모달 분석을 수행하여 산출된 첫 5개의 모드에 대한 모달 파라미터를 나타낸 표이다.

[0158] 도 11을 참조하면, 도 11은 0도, 30도, 45도, 60도 및 90도로 구조 강성이 보강된 단방향 탄소 기반 복합체(UCBC) 각 시편에 대해 산출된 모달 파라미터와 모드 신뢰 기준값(MAC)을 나타내는 표이다. 도 11의 표에 기재된 값은 각 시편에 대해 첫 5개의 모드 형상 벡터에 대해 산출된 모달 파라미터와 모드 신뢰 기준값(MAC)을 나타낸다. 모드 신뢰 기준값은 도 10의 등방성 시편의 모드 형상 벡터와 도 11의 단방향 탄소 기반 복합체(UCBC) 시편들에 대한 MAC 값을 산출한 결과이다.

[0160] 도 12는 UCBC 시편에 대해 수정 전 모드 형상 벡터의 모드 신뢰 기준값(MAC)과 수정 모드 형상 벡터의 모드 신

되 기준값(MAC)을 나타내는 표이다.

[0161] 도 12를 참조하면, 모드 신뢰 기준값들을 비교해 볼 때 수정 모드 형상(modified mode shape) 벡터를 이용한 모드 신뢰 기준값(MAC)이 수정 전 모드 형상(Original model shape) 벡터를 이용한 모드 신뢰 기준값(MAC) 대비 높은 값을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 특정 방향으로 강성이 보강된 상태에서 변화되는 모드 형상 벡터의 영향을 수정 모드 형상 벡터가 최소화하였기 때문에 등방성 시편과 모드 형상의 유사성이 높아졌기 때문이다. 따라서 본 발명의 모드 변화 분석 방법을 사용할 경우, 특정 방향으로 강성이 보강된 소재와 강성 보강이 없는 소재 사이의 모드 형상 벡터의 유사성을 모드 신뢰 기준값(MAC) 값을 활용하여 평가할 수 있으며, 동일한 차수의 모드 형상 파라미터를 식별하는데 우수한 결과를 도출할 수 있다.

[0163] 도 13은 UCBC 시편의 구조 강성 변화를 나타내는 도면이고, 도 14는 UCBC 시편의 점성 감쇠 계수 변화를 나타내는 도면이다.

[0164] 도 13 및 도 14는 본 발명에 따른 수정 모드형상 벡터를 활용하여 단방향 탄소 기반 복합체(UCBC) 시편들에 대한 모달 파라미터 값들이 어떻게 변화되는지를 추적한 결과를 보여준다. 본 발명을 이용하면, 모드 신뢰 기준값(MAC)만을 이용하여 관심 있는 모드에 대한 신뢰성 있는 모드 추적(mode tracking)을 수행할 수 있다.

[0166] 도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법을 설명하는 흐름도이다.

[0167] 도 15를 참조하면, 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치(100)는 가진기(120)를 통해 단일 방향성을 갖는 소재 시편의 일측에 기설정된 패턴의 물리적 힘을 가진하고(단계 S1510), 센서(130)를 통해 시편의 적어도 하나 이상의 감지 위치에서 물리적 힘에 의해 생성된 진동 신호를 감지한다(단계 S1520).

[0168] 모달 분석부(142)는 시편에 가해진 물리적 힘과 소재 시편의 감지 위치에서 측정된 진동 신호를 기초로 해당 수집 위치에 대한 주파수 응답을 모달 분석하여, 소재 시편에 대한 적어도 하나 이상의 모드 형상 벡터를 산출한다(단계 S1530).

[0169] 수정 모드 형상 벡터 산출부(144)는 시편의 구조 중심을 지나는 Normal line과 감지 위치 사이의 거리를 기초로 획득된 모드 형상 벡터를 보상하여 수정 모드 형상 벡터를 산출하고(단계 S1540), 제1 모드 신뢰 기준값 산출부(146)는 수정 모드 형상 벡터를 이용하여 시편에 대한 제1 모드 신뢰 기준값(MAC)을 산출한다(단계 S1550).

[0170] 제2 모드 신뢰 기준값 산출부(148)는 모달 분석부(142)에서 산출된 모드 형상 벡터를 기초로 시편에 대한 제2 모드 신뢰 기준값을 산출한다.

[0171] 시편에 대한 모달 분석을 통해 모달 파라미터를 획득하는 내용과 수정 모드 형상 벡터를 산출하는 과정 및 각 모드 신뢰 기준값을 획득하는 내용은 상기 도 1 내지 도 9에서 설명한 바와 같다.

[0173] 도 1 내지 도 15를 통해 설명된 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치는 컴퓨터에 의해 실행되는 애플리케이션이나 모듈과 같은 컴퓨터에 의해 실행 가능한 명령어를 포함하는 기록 매체의 형태로도 구현될 수도 있다.

[0174] 이상 본 발명의 실시예로 설명하였으나 본 발명의 기술적 사상이 상기 실시예로 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범주에서 다양한 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 방법 및 이를 이용한 분석 장치로 구현할 수 있다.

부호의 설명

[0175] 100 : 단일 방향성을 갖는 소재의 모드 변화 분석 장치

110: 시편

120: 가진기

130: 센서

140: 모드 변화 분석부

142: 모달 분석부

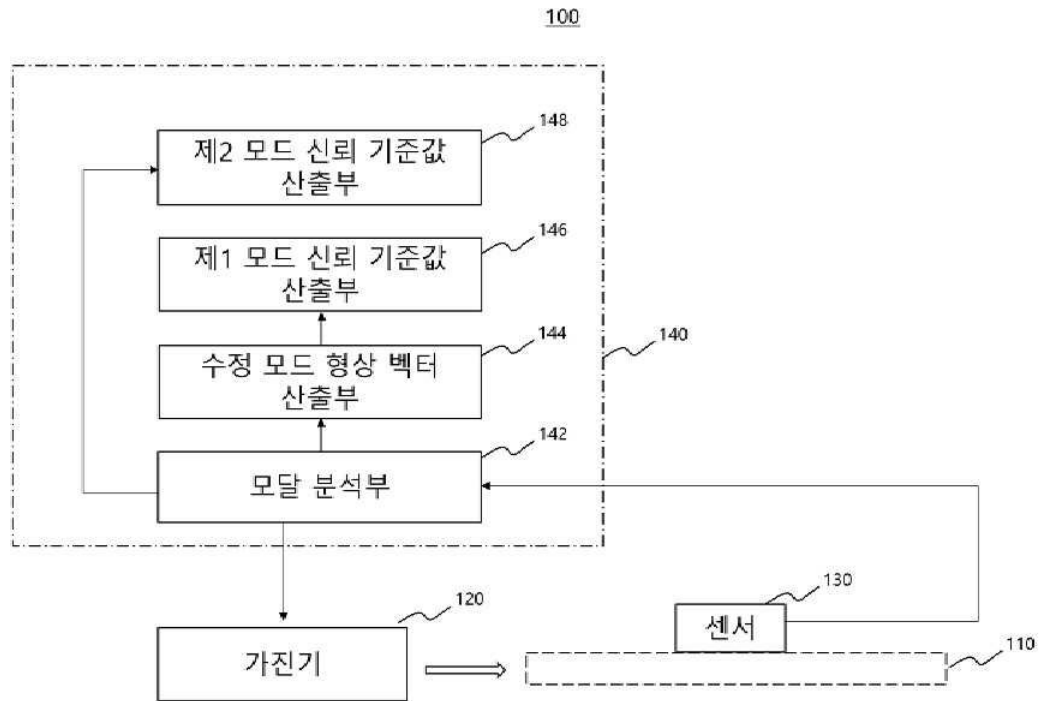
144: 수정 모드 형상 벡터 산출부

146: 제1 모드 신뢰 기준값 산출부

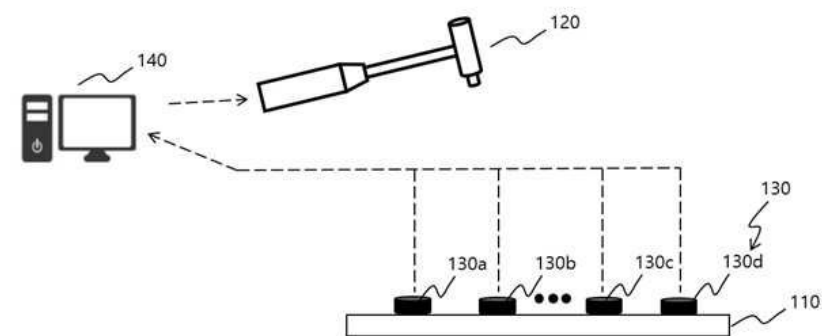
148: 제2 모드 신뢰 기준값 산출부

도면

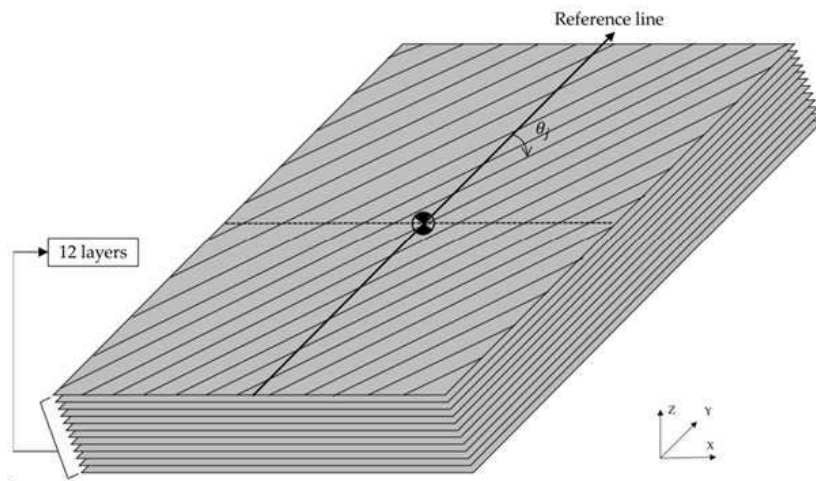
도면1



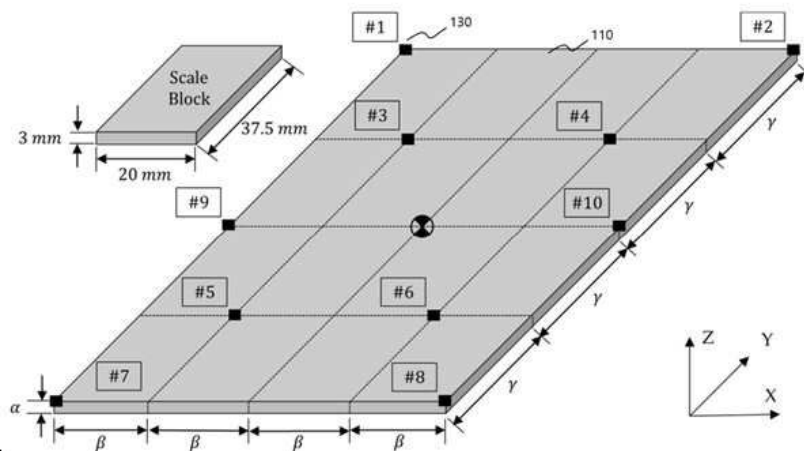
도면2



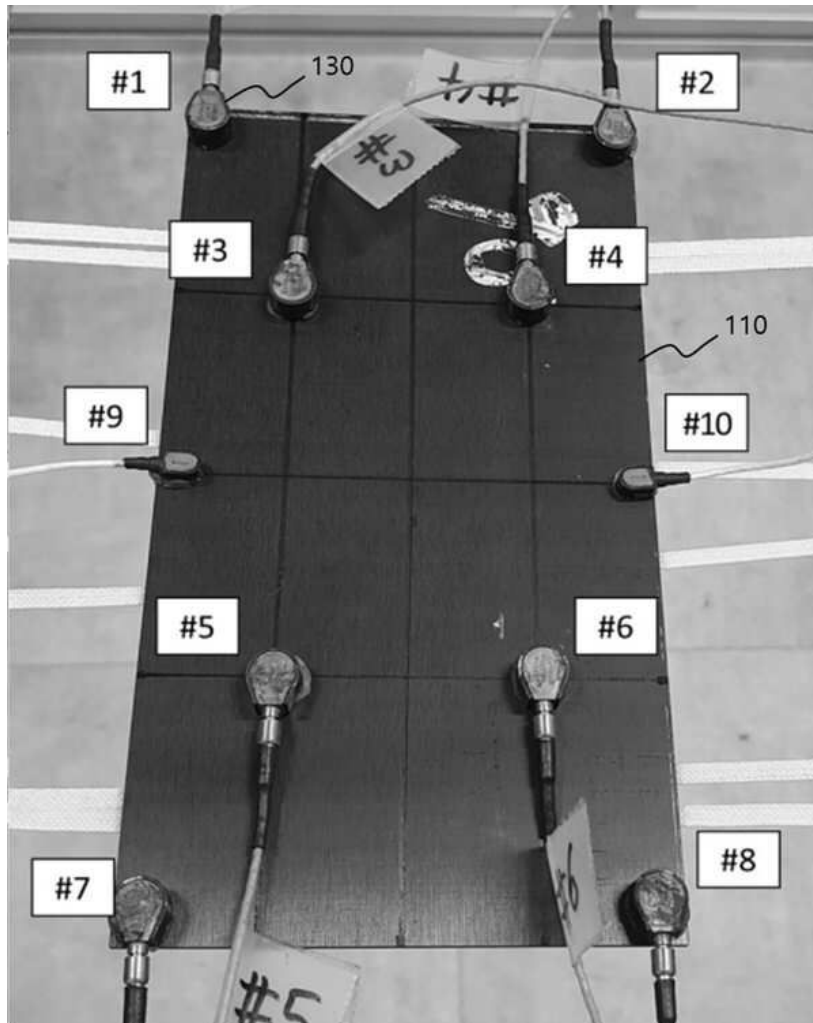
도면3



도면4



도면5

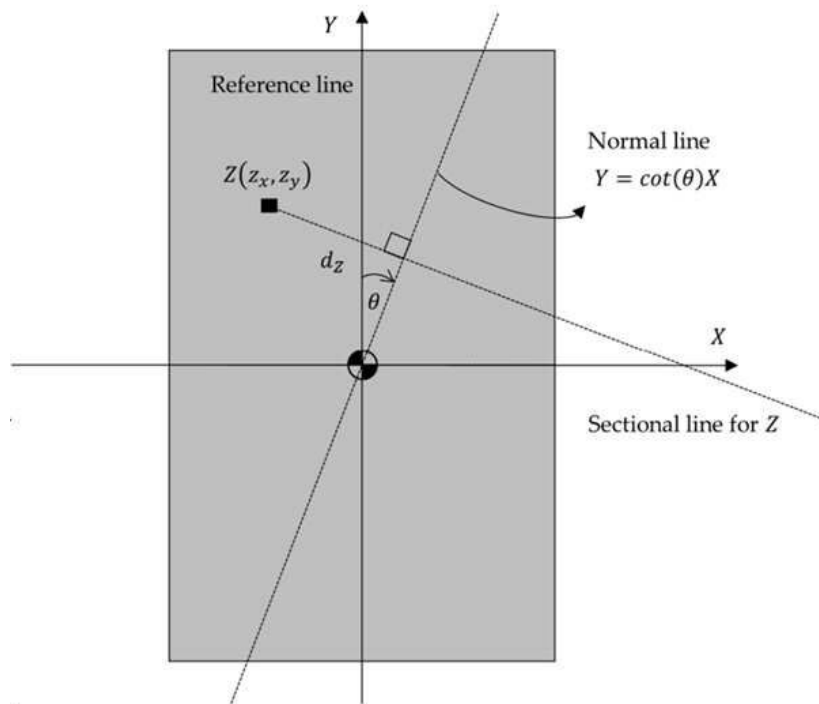


도면6

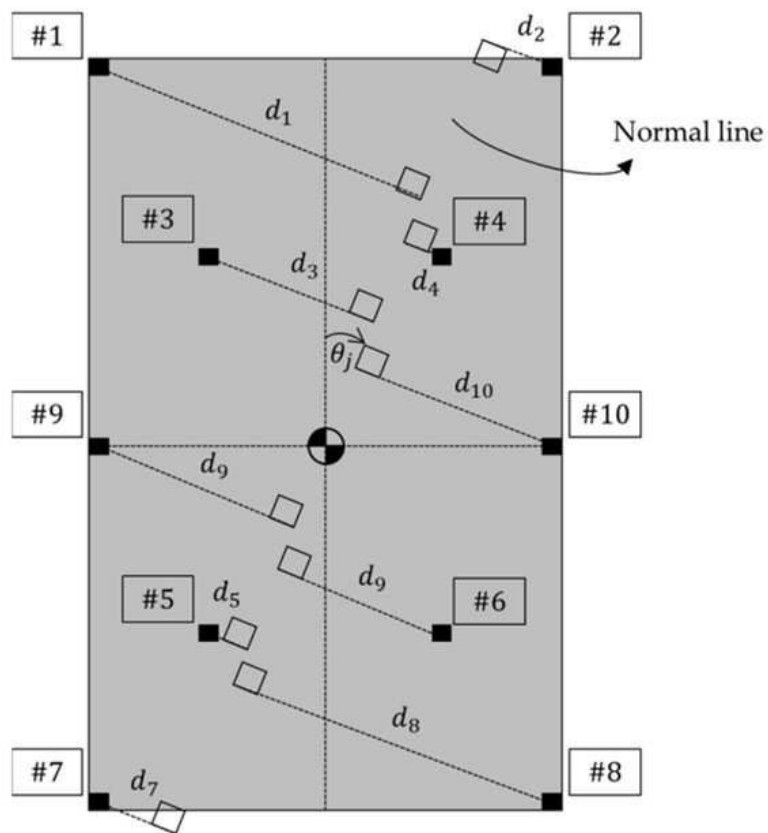
Table A2. Mode shape vector of UCBC #1 specimen. (i : imaginary unit).

Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
$-8.57 - 2.65i$	$5.62 + 0.92i$	$-10.15 - 0.40i$	$-6.39 + 3.48i$	$12.38 - 0.17i$
$-13.34 - 4.28i$	$-4.91 - 3.69i$	$5.01 - 1.20i$	$-0.11 + 1.33i$	$11.14 + 0.32i$
$-1.49 + 0.87i$	$1.54 + 0.07i$	$2.38 + 0.15i$	$6.92 + 0.63i$	$-2.80 + 0.08i$
$-4.28 + 2.52i$	$-1.20 - 1.86i$	$0.32 - 0.42i$	$0.36 + 1.34i$	$-3.13 + 0.22i$
$-2.93 + 1.94i$	$-1.26 - 0.32i$	$1.24 - 0.41i$	$-0.31 - 2.31i$	$-2.79 + 0.23i$
$2.94 - 2.74i$	$0.85 + 4.32i$	$-5.38 + 0.73i$	$-7.66 - 0.64i$	$-1.94 - 0.24i$
$-9.69 + 2.88i$	$-5.62 + 0.06i$	$-2.55 - 0.52i$	$2.44 + 1.54i$	$10.73 - 0.00i$
$-10.58 + 0.79i$	$5.70 - 0.31i$	$9.60 - 1.21i$	$0.58 - 2.45i$	$10.47 + 0.25i$
$16.66 - 4.28i$	$-0.10 + 0.34i$	$5.92 - 0.84i$	$-3.25 - 1.50i$	$-0.11 + 0.17i$
$16.53 - 0.83i$	$0.13 - 0.49i$	$-5.81 - 0.19i$	$4.33 - 0.42i$	$0.16 - 0.06i$

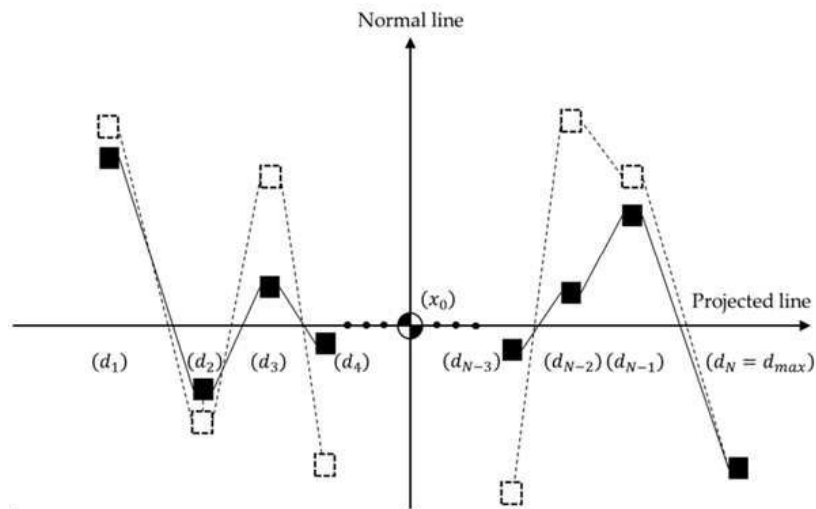
도면7



도면8



도면9



도면10

Modal parameters of 304SS specimen.

Resonance Frequency (Hz)	Modal Damping Ratio (%)	Mode Shape
647.2	0.6	Bending (first)
734.5	0.6	Twisting (first)
1601	0.8	Twisting (second)
1773.2	0.6	Bending (second)
2341.2	0.6	Bending (third)

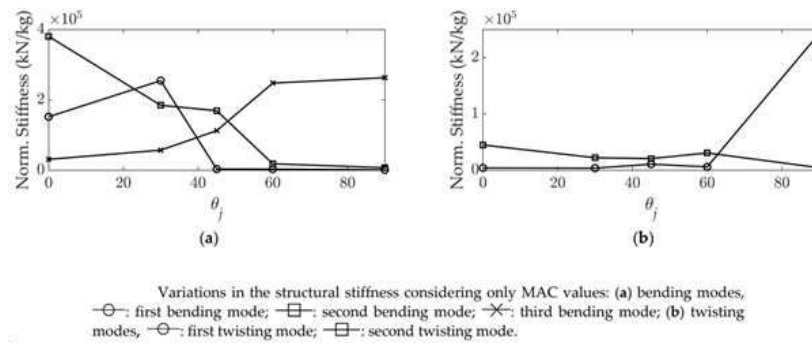
도면11

Specimen	Resonance frequency (Hz)	Modal damping ratio (%)	MAC	Mode type
UCBC #1 ($\theta_1 = 0^\circ$)	1,961.6	5.4	82.7	Bending (first)
	318.0	3.8	97.2	Torsional (first)
	1,064.5	2.7	86.1	Torsional (second)
	3,103.6	5.8	51.7	Bending (second)
	884.1	2.3	77.3	Bending (third)
UCBC #2 ($\theta_2 = 30^\circ$)	2,539.4	7.4	55.5	Bending (first)
	306.5	2.5	42.0	Torsional (first)
	749.3	2.5	56.2	Torsional (second)
	2,162.1	4.4	52.9	Bending (second)
	1,199.8	2.1	44.2	Bending (third)
UCBC #3 ($\theta_3 = 45^\circ$)	285.7	2.6	49.4	Bending (first)
	520.0	1.9	80.3	Torsional (first)
	721.1	1.9	53.4	Torsional (second)
	2,069.3	3.4	65.4	Bending (second)
	1,688.0	2.3	83.8	Bending (third)
UCBC #4 ($\theta_4 = 60^\circ$)	267.6	3.0	64.8	Bending (first)
	387.1	2.3	91.8	Torsional (first)
	881.6	2.2	79.4	Torsional (second)
	680.8	3.4	39.6	Bending (second)
	2,504.9	4.8	72.2	Bending (third)
UCBC #5 ($\theta_5 = 90^\circ$)	158.3	3.5	64.1	Bending (first)
	2,480.5	5.2	83.5	Torsional (first)
	336.0	6.0	72.8	Torsional (second)
	425.6	4.0	87.6	Bending (second)
	2,581.1	0.7	35.9	Bending (third)

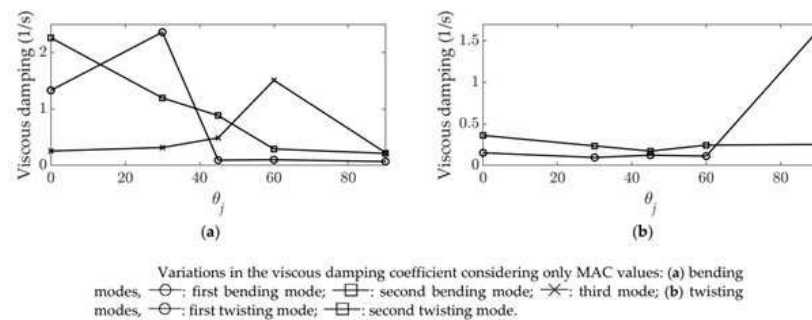
도면12

Specimen	Modified mode shape		Original mode shape		Mode type
	Each MAC	Averaged MAC	Each MAC	Averaged MAC	
UCBC #1 ($\theta_1 = 0^\circ$)	82.7	79.0	73.7	69.4	Bending (first)
	97.2		81.6		Torsional (first)
	86.1		80.3		Torsional (second)
	51.7		35.5		Bending (second)
	77.3		76.1		Bending (third)
UCBC #2 ($\theta_2 = 30^\circ$)	55.5	50.2	46.7	65.7	Bending (first)
	42.0		66.1		Torsional (first)
	56.2		73.7		Torsional (second)
	52.9		71.1		Bending (second)
	44.2		70.7		Bending (third)
UCBC #3 ($\theta_3 = 45^\circ$)	49.4	66.5	65.9	65.0	Bending (first)
	80.3		78.2		Torsional (first)
	53.4		63.2		Torsional (second)
	65.4		64.3		Bending (second)
	83.8		53.2		Bending (third)
UCBC #4 ($\theta_4 = 60^\circ$)	64.8	69.6	88.8	67.9	Bending (first)
	91.8		93.3		Torsional (first)
	79.4		66.8		Torsional (second)
	39.6		47.9		Bending (second)
	72.2		42.9		Bending (third)
UCBC #5 ($\theta_5 = 90^\circ$)	64.1	68.8	81.8	64.6	Bending (first)
	83.5		53.3		Torsional (first)
	72.8		95.8		Torsional (second)
	87.6		82.4		Bending (second)
	35.9		9.8		Bending (third)

도면13



도면14



도면15

