



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년03월04일
(11) 등록번호 10-2223538
(24) 등록일자 2021년02월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/04 (2006.01) G01N 29/07 (2006.01)
G01N 29/36 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/045 (2013.01)
G01N 29/07 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0159479
(22) 출원일자 2019년12월04일
심사청구일자 2019년12월04일
(56) 선행기술조사문헌
KR101693310 B1*
KR102051746 B1*
KR101529690 B1
KR100767340 B1
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)
(72) 발명자
김찬중
부산광역시 연제구 아시아드대로28번길 9, 106동 1204호(거제동, 대우아파트)
(74) 대리인
남건필, 박중수, 김정연, 차상윤

전체 청구항 수 : 총 22 항

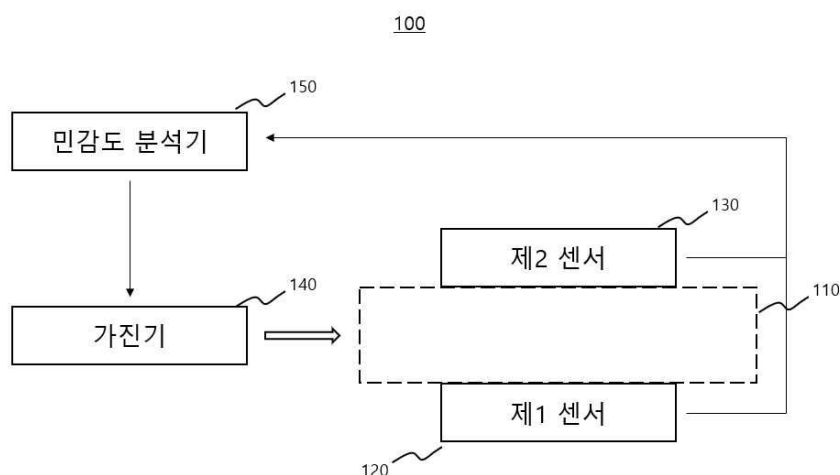
심사관 : 김민석

(54) 발명의 명칭 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법

(57) 요약

본 발명은 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법에 관한 것으로, 본 발명에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치는 제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 시험객체의 일측에 물리적 힘을 가하는 가진기, 상기 시험객체의 일측에 접하며, 상기 가진기에 의해 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘을 측정하는 제1 센서, 상기 시험객체의 타측에 접하며, 상기 물리적 힘에 의해 유발된 상기 시험객체의 진동을 수집하는 제2 센서 및 상기 가진기를 제어하여 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 상기 제1 센서에서 측정된 물리적 힘 신호와 상기 제2 센서에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하여 상기 시험객체의 주파수 응답 함수를 산출하며, 상기 주파수 응답 함수를 기초로 상기 시험객체의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출하는 민감도 분석기를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 29/36 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345294872
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(교육부)(R&D)
연구과제명	다양한 진동 패턴과 온도 영향에 따른 경량 소재들의 모달 감쇠 특성 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	부경대학교
연구기간	2019.03.01 ~ 2020.02.29

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 시험객체의 일측에 물리적 힘을 가하는 가진기;
 상기 시험객체의 일측에 접하며, 상기 가진기에 의해 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘을 측정하는 제1 센서;
 상기 시험객체의 타측에 접하며, 상기 물리적 힘에 의해 유발된 상기 시험객체의 진동을 수집하는 제2 센서; 및
 상기 가진기를 제어하여 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 상기 제1 센서에서 측정된 물리적 힘 신호와 상기 제2 센서에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하여 상기 시험객체의 주파수 응답 함수를 산출하며,
 상기 주파수 응답 함수를 기초로 상기 시험객체의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출하는 민감도 분석기를 포함하고,
 상기 시험객체는 특정 각도로 일 방향성을 갖도록 배열된 재료를 포함하여 형성된 객체인 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 가진기는
 적어도 2개 이상의 가진 패턴으로 물리적 힘을 가하되, 상기 가진 패턴은 랜덤(random) 패턴 및 하모닉(harmonic) 패턴을 포함하고 상기 각 패턴은 동일한 주파수 대역을 갖는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 가진기는
 액추에이터(actuator), 전기 진동기(electrodynamic shaker) 또는 임팩트 해머(impact hammer)를 포함하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 제1 센서는
 상기 가진기와 상기 시험객체 사이 위치하여 상기 물리적 힘을 측정하는 로드 센서(load sensor)를 포함하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 제2 센서는
 가속도 센서(acceleration sensor)를 포함하되, 상기 시험객체의 타측에는 복수의 위치에서 진동을 수집할 수 있도록 복수의 제2 센서가 위치하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 6

삭제

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 시험객체는

탄소 섬유(carbon fiber)를 강화 재료로 포함하는 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)으로 형성된 객체인 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴 및 상기 재료의 배열된 각도를 포함하여 주파수 응답 함수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 9

제8항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

하기 수학적 식 1을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

[수학적 식 1]

$$H(\omega, \theta, p) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i^e}{-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2}$$

여기에서, $H(\omega, \theta, p)$ 는 주파수 응답 함수, θ 는 배열 각도, p 는 주파수 프랙트럼 패턴, $\omega_{n,i}(\theta)$ 는 공진 주파수, $\xi_i(p, \theta)$ 는 감쇠율, R_i^e 는 i 번째 모드 잉여값(residue), ω 는 주파수($=2\pi f$)

청구항 10

제1항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수와 상기 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

하기 수학적 식 2를 이용하여 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

[수학적 식 2]

$$I_{p,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial p} \right| = \left| \omega\omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial p} \right|$$

여기에서, $I_{p,i}(k)$ 는 k 번째 시험객체 표본(specimen)의 i 번째 모드(i -th mode) 주파수 응답 함수에 대한 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수

청구항 12

제10항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

하기 수학적 식 3을 이용하여 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

[수학적 식 3]

$$I_{\theta,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial \theta} \right| = \left| \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega(\xi_i(\theta, p)) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial \theta} \right| j$$

여기에서, $I_{\theta,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 각도(θ)에 따른 민감도 지수

청구항 13

제10항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

상기 재료가 배열된 각도가 다른 적어도 2개 이상의 시험객체에 대해 각각 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수와 각도에 따른 민감도 지수를 산출하고, 각 시험객체에서 산출된 각 민감도 지수를 기초로 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 민감도 분석기는

하기 수학적 식 4를 이용하여 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치.

[수학적 식 4]

$$\tilde{I}_{\theta,i} = \frac{I_{\theta,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{\theta,i}(k)}$$

$$\tilde{I}_{p,i} = \frac{I_{p,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{p,i}(k)}$$

여기에서, $\tilde{I}_{\theta,i}$ 는 각도(θ)에 대한 변환 민감도 지수, $\tilde{I}_{p,i}$ 는 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 대한 변환 민감도 지수

청구항 15

민감도 분석기가 가진기를 제어하여 가진 패턴을 설정하는 단계;

상기 가진기가 제어에 의해 시험객체의 일측에 물리적 힘을 가하는 단계;

제1 센서가 상기 가진기에 의해 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘을 측정하는 단계;

제2 센서가 상기 물리적 힘에 의해 유발된 상기 시험객체의 진동을 수집하는 단계;

민감도 분석기가 상기 제1 센서에서 측정된 물리적 힘 신호와 상기 제2 센서에서 수집된 진동 신호를 주파수 도

메인 신호로 변환하여 상기 시험객체의 주파수 응답 함수를 산출하는 단계; 및

민감도 분석기가 상기 주파수 응답 함수를 기초로 상기 시험객체의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출하는 단계를 포함하고,

상기 시험객체는 특정 각도로 일 방향성을 갖도록 배열된 재료를 포함하여 형성된 객체인 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

청구항 16

제15항에 있어서, 상기 물리적 힘을 가하는 단계는

적어도 2개 이상의 가진 패턴으로 물리적 힘을 가하되, 상기 가진 패턴은 랜덤(random) 패턴 및 하모닉(harmonic) 패턴을 포함하고 상기 각 패턴은 동일한 주파수 대역을 갖는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

청구항 17

삭제

청구항 18

제15항에 있어서, 상기 주파수 응답 함수를 산출하는 단계는

상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴 및 상기 재료의 배열된 각도를 포함하여 주파수 응답 함수를 산출하는 단계를 포함하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

청구항 19

제18항에 있어서, 상기 주파수 응답 함수를 산출하는 단계는

하기 수학적 식 1을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

[수학적 식 1]

$$H(\omega, \theta, p) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i^e}{-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2}$$

여기에서, $H(\omega, \theta, p)$ 는 주파수 응답 함수, θ 는 배열 각도, p 는 주파수 스펙트럼 패턴, $\omega_{n,i}(\theta)$ 는 공진 주파수, $\xi_i(p, \theta)$ 는 감쇠율, R_i^e 는 i 번째 모드 잉여값(residue), ω 는 주파수($=2\pi f$)

청구항 20

제15항에 있어서, 상기 민감도 지수를 산출하는 단계는

상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계; 및

상기 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계를 포함하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

청구항 21

제20항에 있어서, 상기 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계는
 하기 수학적 식 2를 이용하여 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

[수학적 식 2]

$$I_{p,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial p} \right| = \left| \omega \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial p} \right|$$

여기에서, $I_{p,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수

청구항 22

제20항에 있어서, 상기 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계는
 하기 수학적 식 3을 이용하여 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

[수학적 식 3]

$$I_{\theta,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial \theta} \right| = \left| \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega(\xi_i(\theta, p)) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial \theta} \right| j$$

여기에서, $I_{\theta,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 각도 (θ)에 따른 민감도 지수

청구항 23

민감도 분석기가 가진기를 제어하여 가진 패턴을 설정하는 단계;

상기 가진기가 제어에 의해 시험객체의 일측에 물리적 힘을 가하는 단계;

제1 센서가 상기 가진기에 의해 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘을 측정하는 단계;

제2 센서가 상기 물리적 힘에 의해 유발된 상기 시험객체의 진동을 수집하는 단계;

민감도 분석기가 상기 제1 센서에서 측정된 물리적 힘 신호와 상기 제2 센서에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하여 상기 시험객체의 주파수 응답 함수를 산출하는 단계; 및

민감도 분석기가 상기 주파수 응답 함수를 기초로 상기 시험객체의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출하는 단계를 포함하고,

상기 재료가 배열된 각도가 다른 적어도 2개 이상의 시험객체에 대해 각각 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수와 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계; 및

각 시험객체에서 산출된 각 민감도 지수를 기초로 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 단계를 포함하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

청구항 24

제23항에 있어서, 상기 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 단계는

하기 수학적 식 4를 이용하여 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법.

[수학식 4]

$$\tilde{I}_{\theta,i} = \frac{I_{\theta,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{\theta,i}(k)}$$

$$\tilde{I}_{p,i} = \frac{I_{p,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{p,i}(k)}$$

여기에서, $\tilde{I}_{\theta,i}$ 는 각도(θ)에 대한 변환 민감도 지수, $\tilde{I}_{p,i}$ 는 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 대한 변환 민감도 지수

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 내부 구조에 방향성을 갖는 객체에 대해 주파수 응답을 구하여 객체의 물리적 특성을 분석할 수 있는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법에 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, 섬유 강화 재료 및 구조 복합 재료 소재로 나뉜다.

[0003] 복합 재료 소재는 단독 재료 소재에 비해 물리적 또는 화학적으로 강화된 특성을 가지며, 재료에 따라 가볍고 튼튼한 소재를 만들 수도 있다. 예를 들어, 섬유 강화 플라스틱(FRP, Fiber Reinforced Plastic)은 가볍고 튼튼하여, 항공우주분야나 자동차 분야와 같이 소재의 경량화가 필요한 분야에 활용이 기대된다.

[0004] 그러나, 복합 재료 소재의 경우, 소재의 구조(structure)나 재료(material)의 종류에 따라 물리적 특성이 크게 영향을 받는다. 복합 재료 소재를 이용하여 제조를 하는 경우, 설계자는 최종 제품의 요구 사항(requirement)에 부합하는 물리적 특성을 갖는 복합 재료 소재를 사용하여야 하며, 설계 과정에서 복합 재료 소재의 물리적 특성을 확인하여야 한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허공보 10-2018-0091873 (2018.08.16), 3쪽 내지 4쪽

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 내부 구조에 방향성을 갖는 객체에 대해 방향성을 고려하여 해당 객체의 물리적 특성을 분석할 수 있는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법을 제공한다.

[0007] 본 발명은 내부 구조에 방향성을 갖는 객체에 대해 방향성뿐만 아니라 다양한 외부 힘 패턴까지 고려하여 민감도를 산출하여 제공함으로써, 제품 설계자가 미리 제품의 성능을 예상해 볼 수 있는 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

- [0008] 본 발명에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치는 제어에 의해 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 시험객체의 일측에 물리적 힘을 가하는 가진기, 상기 시험객체의 일측에 접하며, 상기 가진기에 의해 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘을 측정하는 제1 센서, 상기 시험객체의 타측에 접하며, 상기 물리적 힘에 의해 유발된 상기 시험객체의 진동을 수집하는 제2 센서 및 상기 가진기를 제어하여 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 상기 제1 센서에서 측정된 물리적 힘 신호와 상기 제2 센서에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하여 상기 시험객체의 주파수 응답 함수를 산출하며, 상기 주파수 응답 함수를 기초로 상기 시험객체의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출하는 민감도 분석기를 포함한다.
- [0009] 일 실시예에서, 상기 가진기는 적어도 2개 이상의 가진 패턴으로 물리적 힘을 가하되, 상기 가진 패턴은 랜덤(random) 패턴 및 하모닉(harmonic) 패턴을 포함하고 상기 각 패턴은 동일한 한 주파수 대역을 갖는다.
- [0010] 일 실시예에서, 상기 가진기는 액추에이터(actuator), 전기 진동기(electrodynamic shaker) 또는 임팩트 해머(impact hammer)를 포함한다.
- [0011] 일 실시예에서, 상기 제1 센서는 상기 가진기와 상기 시험객체 사이 위치하여 상기 물리적 힘을 측정하는 로드 센서(load sensor)를 포함한다.
- [0012] 일 실시예에서, 상기 제2 센서는 가속도 센서(acceleration sensor)를 포함하되, 상기 시험객체의 타측에는 복수의 위치에서 진동을 수집할 수 있도록 복수의 제2 센서가 위치한다.
- [0013] 일 실시예에서, 상기 시험객체는 특정 각도로 일 방향성을 갖도록 배열된 재료를 포함하여 형성된 객체이다.
- [0014] 일 실시예에서, 상기 시험객체는 탄소 섬유(carbon fiber)를 강화 재료로 포함하는 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)으로 형성된 객체이다.
- [0015] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴 및 상기 재료의 배열된 각도를 포함하여 주파수 응답 함수를 산출한다.
- [0016] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 하기 수학식 1을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출한다.
- [0017] [수학식 1]

$$H(\omega, \theta, p) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i^e}{-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2}$$

- [0018] 여기에서, $H(\omega, \theta, p)$ 는 주파수 응답 함수, θ 는 배열 각도, p 는 주파수 프랙트럼 패턴, $\omega_{n,i}(\theta)$ 는 공진 주파수, $\xi_i(p, \theta)$ 는 감쇠율, R_i^e 는 i 번째 모드 잉여값(residue), ω 는 주파수($=2\pi f$)

- [0019] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수와 상기 각도에 따른 민감도 지수를 산출한다.
- [0020] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 하기 수학식 2를 이용하여 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수를 산출한다.
- [0021] [수학식 2]

$$I_{p,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial p} \right| = \left| \omega \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial p} \right|$$

- [0022]
- [0023] 여기에서, $I_{p,i}(k)$ 는 k 번째 시험객체 표본(specimen)의 i 번째 모드(i -th mode) 주파수 응답 함수에 대한 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수
- [0024] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 하기 수학식 3을 이용하여 각도에 따른 민감도 지수를 산출한다.

[0025] [수학식 3]

$$I_{\theta,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial \theta} \right| = \left| \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega(\xi_i(\theta, p)) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial \theta} \right| j$$

[0026]

[0027] 여기에서, $I_{\theta,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 각도(θ)에 따른 민감도 지수

[0028] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 상기 재료가 배열된 각도가 다른 적어도 2개 이상의 시험객체에 대해 각각 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수와 각도에 따른 민감도 지수를 산출하고, 각 시험객체에서 산출된 각 민감도 지수를 기초로 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출한다.

[0029] 일 실시예에서, 상기 민감도 분석기는 하기 수학식 4를 이용하여 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출한다.

[0030] [수학식 4]

$$\tilde{I}_{\theta,i} = \frac{I_{\theta,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{\theta,i}(k)}$$

$$\tilde{I}_{p,i} = \frac{I_{p,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{p,i}(k)}$$

[0031]

[0032] 여기에서, $\tilde{I}_{\theta,i}$ 는 각도(θ)에 대한 변환 민감도 지수, $\tilde{I}_{p,i}$ 는 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 대한 변환 민감도 지수

[0033] 본 발명에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법은 민감도 분석기가 가진기를 제어하여 가진 패턴을 설정하는 단계, 상기 가진기가 제어에 의해 시험객체의 일측에 물리적 힘을 가하는 단계, 제1 센서가 상기 가진기에 의해 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘을 측정하는 단계, 제2 센서가 상기 물리적 힘에 의해 유발된 상기 시험객체의 진동을 수집하는 단계, 민감도 분석기가 상기 제1 센서에서 측정된 물리적 힘 신호와 상기 제2 센서에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하여 상기 시험객체의 주파수 응답 함수를 산출하는 단계 및 민감도 분석기가 상기 주파수 응답 함수를 기초로 상기 시험객체의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출하는 단계를 포함한다.

[0034] 일 실시예에서, 상기 물리적 힘을 가하는 단계는 적어도 2개 이상의 가진 패턴으로 물리적 힘을 가하되, 상기 가진 패턴은 랜덤(random) 패턴 및 하모닉(harmonic) 패턴을 포함하고 상기 각 패턴은 동일한 주파수 대역을 갖는다.

[0035] 일 실시예에서, 상기 시험객체는 특정 각도로 일 방향성을 갖도록 배열된 재료를 포함하여 형성된 객체이다.

[0036] 일 실시예에서, 상기 주파수 응답 함수를 산출하는 단계는 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴 및 상기 재료의 배열된 각도를 포함하여 주파수 응답 함수를 산출하는 단계를 포함한다.

[0037] 일 실시예에서, 상기 주파수 응답 함수를 산출하는 단계는 하기 수학식 1을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출한다.

[0038] [수학식 1]

$$H(\omega, \theta, p) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i^e}{-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2}$$

[0039] 여기에서, $H(\omega, \theta, p)$ 는 주파수 응답 함수, θ 는 배열 각도, p 는 주파수 스펙트럼 패턴, $\omega_{n,i}(\theta)$ 는 공진 주파수, $\xi_i(p, \theta)$ 는 감쇠율, R_i^e

는 i번째 모드 잉여값(residue), ω 는 주파수($=2\pi f$)

[0040] 일 실시예에서, 상기 민감도 지수를 산출하는 단계는 상기 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계 및 상기 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계를 포함한다.

[0041] 일 실시예에서, 상기 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계는 하기 수학적식 2를 이용하여 민감도 지수를 산출한다.

[0042] [수학적식 2]

$$I_{p,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial p} \right| = \left| \omega \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial p} \right|$$

[0043] 여기서, $I_{p,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수

[0045] 일 실시예에서, 상기 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계는 하기 수학적식 3을 이용하여 민감도 지수를 산출한다.

[0046] [수학적식 3]

$$I_{\theta,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial \theta} \right| = \left| \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega(\xi_i(\theta, p) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial \theta}) \right|$$

[0047] 여기서, $I_{\theta,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 각도(θ)에 따른 민감도 지수

[0049] 일 실시예에서, 상기 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법은 상기 재료가 배열된 각도가 다른 적어도 2개 이상의 시험객체에 대해 각각 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 민감도 지수와 각도에 따른 민감도 지수를 산출하는 단계 및 각 시험객체에서 산출된 각 민감도 지수를 기초로 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 단계를 포함한다.

[0050] 일 실시예에서, 상기 변환(scaled) 민감도 지수를 산출하는 단계는 하기 수학적식 4를 이용하여 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출한다.

[0051] [수학적식 4]

$$\tilde{I}_{\theta,i} = \frac{I_{\theta,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{\theta,i}(k)}$$

$$\tilde{I}_{p,i} = \frac{I_{p,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{p,i}(k)}$$

[0052] 여기서, $\tilde{I}_{\theta,i}$ 는 각도(θ)에 대한 변환 민감도 지수, $\tilde{I}_{p,i}$ 는 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 대한 변환 민감도 지수

발명의 효과

[0054] 이상에서 설명한 바와 같이, 본 발명에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법은 내부 구조에 방향성을 갖는 객체에 대해 방향성을 고려하여 분석함으로써 해당 객체의 물리적 특성을 보다 정확하게 분석할 수 있다.

[0055] 본 발명에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법은 내부 구조에 방향성을 갖는 객체에 대해 방향성뿐만 아니라 다양한 외부 힘 패턴까지 고려하여 민감도를 산출하여 제공함으로써,

제품 설계자가 미리 제품의 성능을 예상해 볼 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0056] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치의 구성을 나타내는 구성도
- 도 2는 복수의 센서를 포함하는 민감도 분석 장치의 구성을 예시적으로 나타낸 구성도
- 도 3은 시험객체를 개략적으로 나타낸 도면
- 도 4a와 도 4b는 민감도 분석 장치를 실험적으로 구성한 예를 나타내는 도면
- 도 5a, 도 5b 및 도 5c는 각 시험객체(#1, #2, #3)의 주파수 응답 함수를 도식화한 도면
- 도 6a와 도 6b는 배열 각도에 따른 시험객체의 공진주파수(resonance frequency)를 도식화한 도면
- 도 7a와 도 7b는 배열 각도에 따른 시험객체의 감쇠율(damping ratio)을 도식화한 도면
- 도 8a와 도 8b는 각 시험객체(#1, #2, #3)의 제1 모드 주파수 응답 함수를 이용하여 산출된 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면
- 도 9a와 도 9b는 각 시험객체(#1, #2, #3)의 제2 모드 주파수 응답 함수를 이용하여 산출된 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면
- 도 10은 각 시험객체(#1, #2, #3)의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면
- 도 11은 각 시험객체(#1, #2, #3)의 감쇠율 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면
- 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법을 설명하는 흐름도

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0057] 이하, 본 발명에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법을 실시하기 위한 구체적인 내용을 설명하면 다음과 같다.
- [0058] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치의 구성을 나타내는 구성도이다.
- [0059] 도 1을 참조하면, 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치(100)는 제1센서(120), 제2센서(130), 가진기(140) 및 민감도 분석기(150)를 포함할 수 있다.
- [0060] 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치(100)는 시험객체(test object)(110)에 대해 내부 구조의 방향성뿐만 아니라 다양한 외부 힘 패턴까지 고려하여 주파수 응답 함수(frequency response function)를 산출하고, 산출된 주파수 응답 함수를 기초로 시험객체(110)의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity index)를 산출한다. 사용자는 산출된 민감도 지수를 통해 다양한 종류의 시험객체에 대해 물리적 특성을 비교하여 유추할 수 있다.
- [0061] 시험객체(110)는 민감도를 분석하기 위한 대상 객체이다. 시험객체(110)는 테스트하려는 소재의 일부 표본(specimen)일 수도 있고 테스트 소재로 구성된 부품일 수도 있다. 일 실시예에서, 시험객체(110)는 특정 각도로 일 방향성을 갖도록 배열된 재료를 포함하여 형성된 객체, 예를 들어, 복합 재료 소재일 수 있다.
- [0062] 예를 들어, 시험객체(110)는 탄소 섬유(carbon fiber)를 강화재료로 사용하는 탄소섬유강화플라스틱(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic)에 해당할 수 있다. 탄소섬유강화플라스틱의 물리적 특성(mechanical properties)은 이를 구성하는 탄소 섬유와 폴리머 레진(polymer resin)의 상태(conditions), 소재 내 탄소 섬유의 적층 구조(layered structure) 등에 의해 영향을 받는다. 특히, 강화재료인 탄소 섬유의 방향(direction)은 탄소섬유강화플라스틱의 물리적 특성을 결정하는 데 큰 역할을 하므로, 탄소섬유강화플라스틱은 외부 힘의 주 방향(principle direction)을 고려하여 설계되어야 한다.
- [0063] 이하에서는 설명의 편의를 위해, 탄소섬유강화플라스틱 표본을 시험객체(110)로 사용하는 경우를 가정하여 설명하기로 한다.
- [0064] 일 실시예에서, 시험객체(110)는 자동 이송 장치(미도시)를 통해 테스트 위치에 놓일 수 있고, 지그(jig)를 통해 테스트 위치에 고정될 수 있다.

- [0065] 제1센서(120)는 시험객체(110)의 일 측에 접하며, 가진기(140)에 의해 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘을 측정한다. 제1센서(120)는 측정된 값을 민감도 분석기(150)로 전송한다. 일 실시예에서, 제1 센서(120)는 가진기(140)와 시험객체(110) 사이 위치하여, 가진기(140)에 의해 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘을 측정할 수 있다. 일 실시예에서, 가진기(140) 위에 제1 센서(120)를 접하여 위치시키고, 제1 센서(120) 위에 시험객체(110)를 접하여 위치시킬 수 있다. 제1 센서(120)는 로드 센서(load sensor)를 포함한다.
- [0066] 제2센서(130)는 시험객체(110)의 타측에 접하며, 물리적 힘에 의해 유발된 시험객체(110)의 진동을 수집한다. 일 실시예에서, 제2 센서는 시험객체(110)의 가속도 변위를 측정하는 가속도 센서(acceleration sensor)를 포함할 수 있다. 다른 실시예에서, 제2 센서는 시험객체(110)의 위치 변위를 측정하는 위치 변위 센서(displacement sensor) 또는 속도 변위를 측정하는 속도 센서(velocity sensor)를 포함할 수 있다.
- [0067] 진동 수집 위치에 따라 제2 센서에서 수집되는 측정 값에 미세한 차이가 있을 수 있다. 복수의 센서를 사용하여 복수의 위치에서 측정된 값을 이용하는 경우, 보다 정확한 측정을 할 수 있다. 일 실시예에서, 시험객체(110)의 타 측에 복수의 위치에 복수의 제2 센서(130)를 위치시켜, 각각의 제2 센서(130)에서 진동을 수집할 수 있다.
- [0068] 도 2는 복수의 센서를 포함하는 민감도 분석 장치의 구성을 예시적으로 나타낸 구성도이다.
- [0069] 도 2를 참조하면, 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치(200)는 제1센서(120), 제2센서(130), 가진기(140) 및 민감도 분석기(150)를 포함할 수 있다. 복수의 제2센서(130)를 사용하는 구성 외에 나머지 구성은 도 1과 동일하다.
- [0070] 복수의 제2센서(130a, 130b, 130c, 130d, ...)의 위치는 기 설정된 위치일 수도 있고, 사용자에게 의해 정해진 위치일 수도 있다. 복수의 제2센서(130a, 130b, 130c, 130d, ...)들은 해당 위치에서 진동을 수집하여 민감도 분석기(150)로 전송한다.
- [0071] 다시 도 1을 참조하면, 가진기(140)는 민감도 분석기(150)의 제어에 따라 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 시험객체(110)의 일측에 물리적 힘을 가한다. 일 실시예에서, 가진기(140)는 각각 다른 가진 패턴으로 시험객체(110)에 물리적 힘을 가할 수 있다. 가진기(110)는 일 축 방향으로 힘을 가하는 단축 가진기, 2축 방향으로 힘을 가하는 2축 가진기, 3축 방향으로 힘을 가하는 3축 가진기 등을 포함할 수 있다. 이하에서는, 설명의 편의를 위해 단축 가진기를 가진기(140)로 사용하는 경우를 가정하여 설명하기로 한다. 예를 들어, 가진기(140)는 일 축 방향으로 힘을 가하여 진동시키는 전기 진동기(electrodynamic shaker) 또는 액추에이터(actuator)를 포함할 수 있다.
- [0072] 가진기(140)는 민감도 분석기(150)의 제어에 따라 적어도 2개 이상의 가진 패턴으로 시험객체(110)에 물리적 힘을 가한다. 일 실시예에서, 가진 패턴은 랜덤(random) 패턴 및 하모닉(harmonic) 패턴을 포함하고 각 패턴은 동일한 주파수 대역을 가질 수 있다. 랜덤 패턴은 임의의 복수 주파수 신호를 포함하는 패턴이며, 하모닉 패턴은 기본 주파수(fundamental frequency)의 정현파 신호를 포함하는 패턴을 말한다.
- [0073] 다른 실시예에서, 자동으로 시험객체(110)에 임팩트를 인가할 수 있는 고정식 임팩트 장치(예를 들어, 임팩트 해머(impact hammer))를 가진기(140)로 사용할 수도 있다. 임팩트 해머는 시험객체(110)에 물리적 손상을 일으키지 않고, 시험을 위한 사전 가공이 필요하지 않으며, 넓은 주파수에 걸쳐 시험객체(110)에 임팩트를 인가할 수 있다. 임팩트 해머의 경우, 실제 가진이 되는 부분(임팩트 부분)에는 팁(tip)이 구비될 수 있다.
- [0074] 이하에서는 설명의 편의를 위해, 전기 진동기(electrodynamic shaker)를 가진기(140)로 사용하는 경우를 가정하여 설명하기로 한다. 전기 진동기(electrodynamic shaker)는 가진 주파수와 가진 패턴을 정밀하게 제어할 수 있어, 반복된 테스트에서도 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있다.
- [0075] 민감도 분석기(150)는 가진기(140)를 제어하여 가진 패턴을 설정하고, 설정된 가진 패턴에 따라 제1 센서(120)에서 측정된 물리적 힘 신호와 제2 센서(130)에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인(frequency domain) 신호로 변환하여 시험객체(110)의 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)를 산출한다. 민감도 분석기(150)는 주파수 응답 함수를 기초로 시험객체(110)의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity index)를 산출한다. 시험객체(Object)(110)를 선형 시스템(Linear system)으로 가정할 때, 주파수 응답 함수를 이용한 분석 방법은 해당 시험객체의 물리적 특성을 분석하는 데 효율적인 방법 가운데 하나이다.
- [0076] 이하에서는 민감도 분석기(150)가 주파수 응답 함수를 산출하고 민감도 지수를 산출하는 과정을 자세히 설명하기로 한다.
- [0077] 외부 물리적 힘을 F라고 할 경우, 시험객체(110)의 1자유도(1-DOF, Degree of Freedom) 선형 모델식은 하기 수

학식 1로 표시될 수 있다.

[0078] [수학식 1]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$$

[0079]

[0080] 여기에서, m은 시험객체의 질량(mass), c는 감쇠계수(damping coefficient), k는 강성계수(stiffness coefficient), F는 외부에서 가해진 물리적 힘, x는 외부 힘에 의해 유발된 시험객체(110)의 변위

[0081] 수학식 1을 기초로 산출된 시험객체(110)의 공진 주파수(resonant frequency 또는 natural frequency)는 하기 수학식 2로 표시될 수 있으며, 시험객체(110)의 감쇠율(damping ratio)은 하기 수학식 3으로 표시될 수 있다.

[0082] [수학식 2]

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}, \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

[0083]

[0084] 여기에서, ω_n 은 공진 주파수

[0085] [수학식 3]

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

[0086]

[0087] 여기에서, ω_n 은 공진 주파수 ξ 는 감쇠율

[0088] 하기 수학식 4는 1자유도(1-DOF) 선형 모델식인 수학식 1을 질량 정규화(mass normalization)하여 모달 좌표(modal coefficient)로 확장한 식으로, 공진 주파수와 감쇠율 값을 이용하여 나타낸 것이다.

[0089] [수학식 4]

$$\ddot{x} + 2\omega_n \xi \dot{x} + \omega_n^2 x = f, f(t) = \frac{F}{m}$$

[0090]

[0091] 수학식 4를 N자유도(N-DOF)의 일반 모달식으로 표현하는 경우, 하기 수학식 5의 행렬식으로 표시될 수 있다.

[0092] [수학식 5]

$$\begin{bmatrix} 1 & & \text{zeros} \\ & \ddots & \\ \text{zeros} & & 1 \end{bmatrix} \ddot{X} + \begin{bmatrix} 2\omega_{n,1}\xi_1 & & \text{zeros} \\ & \ddots & \\ \text{zeros} & & 2\omega_{n,N}\xi_N \end{bmatrix} \dot{X} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \text{zeros} \\ & \ddots & \\ \text{zeros} & & \omega_N^2 \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$

[0093]

[0094] 여기에서, $\omega_{n,i}$ 은 i번째 모드(i-th mode) 공진 주파수, ξ_i 는 i번째 모드 감쇠율, F_i 는 i번째 모드 외부 힘, $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ (모달 좌표 열 벡터(column vector))

[0095] 단일 입력 조건에서($F_i = 0$, except $i \neq j$), F_j 의 주파수 응답 함수는 하기 수학식 6으로 표시될 수 있다.

[0096] [수학식 6]

$$\frac{R(\omega)}{F_j(\omega)} = H(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i^e}{-\omega^2 + 2\omega_{n,i}\omega\xi_i + \omega_{n,i}^2}$$

[0097]

[0098] 여기에서, $H(\omega)$ 는 주파수 응답 함수, $R(\omega)$ 는 출력(x) 값을 주파수 도메인으로 변환한 값, $F_j(\omega)$ 는 입력(F) 값을 주파수 도메인으로 변환한 값, R_i^e 는 i번째 모드 잉여값(residue), ω 는 주파수($=2\pi f$)

[0099] 잉여값(residue)은 입력 값(외부 힘, $F_j(\omega)$)에 비해 무시할 정도로 작으므로, 주파수 응답 함수는 $\omega_{n,i}$ 와 ξ_i 의 영향을 받는다.

[0100] 설명의 편의를 위해 시험객체(110)가 특정 각도로 일 방향성을 갖도록 배열된 재료를 포함하여 형성된 복합 재료 소재, 예를 들어 탄소섬유강화플라스틱 표본인 경우를 가정하여 설명하기로 한다.

[0101] 탄소섬유강화플라스틱은 탄소섬유가 일 방향성을 갖도록 배열될 수 있으며, 탄소섬유의 방향(배열 각도)에 따라 소재의 물리적 특성(예를 들어, 힘(strength) 등)이 달라질 수 있다.

[0102] 도 3은 시험객체를 개략적으로 나타낸 도면이다.

[0103] 도 3을 참조하면, 시험객체는 길이(L), 넓이(W), 높이(H)를 갖는 형태이며, 일 방향성을 갖도록 배열된 재료의 각도는 높이(H) 방향으로 θ 각도로 배열된 것으로 가정한다. 예를 들어, 탄소섬유강화플라스틱의 경우 탄소섬유가 높이 방향으로 θ 각도로 배열된 것으로 가정한다.

[0104] 시험객체의 질량을 동일하게 할 경우, 공진 주파수는 강성계수(stiffness coefficient, k)에 의해 변동하며, 공진 주파수($\omega_{n,i}$)는 탄소섬유의 방향을 고려하여 $\omega_{n,i}(\theta)$ 로 표시될 수 있다. 또한, 감쇠율(ξ_i)은 입력된 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴의 종류와 탄소섬유의 방향에 영향을 받는 것을 고려하여 $\xi_i(p, \theta)$ 로 표시될 수 있다. 여기에서, p는 입력된 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴, θ 는 재료가 배열된 각도를 나타낸다.

[0105] $\omega_{n,i}(\theta)$ 와 $\xi_i(p, \theta)$ 값은 시험객체(110)에 대한 시험을 통해 얻어질 수 있다. 예를 들어, 감쇠 공진 주파수(damped natural frequency)는 측정된 주파수 응답 함수의 i번째 피크점(peak point)에서 얻을 수 있다. 감쇠 공진 주파수를 기준으로 감쇠 공진 주파수의 에너지 값의 절반($1/2$)이 되는 양쪽 지점의 주파수 값을 각각 $\omega_{d,i}^{(1)}$, $\omega_{d,i}^{(2)}$ 라고 할 경우, $\xi_i(p, \theta)$ 는 하기 수학적 식 7로부터 얻어질 수 있다.

[0106] [수학적 식 7]

$$\xi_i(p, \theta) = \frac{|\omega_{d,i}^{(2)} - \omega_{d,i}^{(1)}|}{2\omega_{d,i}}$$

[0107] , 여기에서, $\omega_{d,i}$ 는 감쇠 공진 주파수

[0108] 공진 주파수($\omega_{n,i}(\theta)$)는 수학적 식 7과 수학적 식 2를 통해 얻어질 수 있다.

[0109] 민감도 분석기(150)는 시험객체에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴(p)과 재료의 배열된 각도(θ)를 포함하여 주파수 응답 함수를 산출한다. 상기에서 설명한 바와 같이, 민감도 분석기(150)는 수학적 식 7과 수학적 식 2를 통해 $\omega_{n,i}(\theta)$ 와 $\xi_i(p, \theta)$ 값을 구하고, 주파수 스펙트럼 패턴(p)과 재료의 배열된 각도(θ)를 고려한 시험객체(110)의 주파수 응답 함수를 하기 수학적 식 8과 같이 산출할 수 있다.

[0110] [수학적 식 8]

$$H(\omega, \theta, p) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i^e}{-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2}$$

[0111]

[0112] 민감도 분석기(150)는 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수와 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 산출한다.

[0113] 민감도 분석기(150)는 수학적 식 8의 주파수 응답 함수를 주파수 스펙트럼 패턴(p)과 각도(θ)를 변수로 하여 각각 편미분(partial derivative)한다. 하기 수학적 식 9는 각도(θ)에 대해 편미분한 값을 나타내며, 수학적 식 10은 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 대해 편미분한 값을 나타낸다.

[0114] [수학식 9]

$$\frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial \theta} = \sum_{i=1}^N \frac{-2R_i^e}{[-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2]^2} \left\{ (\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega\omega_{n,i}(\theta)j \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial \theta} \right\}$$

[0116] [수학식 10]

$$\frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial p} = \sum_{i=1}^N \frac{-2R_i^e}{[-\omega^2 + 2\omega_{n,i}(\theta)\omega\xi_i(\theta, p)j + \omega_{n,i}(\theta)^2]^2} \left\{ \omega\omega_{n,i}(\theta)j \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial p} \right\}$$

[0118] 민감도 분석기(150)는 수학식 9를 이용하여 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 산출한다. 하기 수학식 11은 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 나타낸다.

[0119] [수학식 11]

$$I_{\theta,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial \theta} \right| = \left| \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega(\xi_i(\theta, p) \frac{\partial(\omega_{n,i}(\theta))}{\partial \theta} + \omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial \theta}) j \right|$$

[0121] 여기에서, $I_{\theta,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 각도(θ)에 따른 민감도 지수

[0122] 또한, 민감도 분석기(150)는 수학식 10를 이용하여 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수를 산출한다. 하기 수학식 12는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수를 나타낸다.

[0123] [수학식 12]

$$I_{p,i}(k) = \left| \frac{0.5}{H(\omega, \theta, p)} \frac{\partial(H(\omega, \theta, p))}{\partial p} \right| = \left| \omega\omega_{n,i}(\theta) \frac{\partial(\xi_i(\theta, p))}{\partial p} \right|$$

[0125] 여기에서, $I_{p,i}(k)$ 는 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수

[0126] 복수의 시험객체(110)에 대해 각각 민감도 지수가 산출되면, 민감도 분석기(150)는 각 시험객체에 대한 변환 민감도 지수(scaled sensitivity index)를 산출할 수 있다.

[0127] 민감도 분석기(150)는 재료의 배열 각도(θ)가 다른 적어도 2개 이상의 시험객체에 대해 각각 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수와 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 산출하고, 각 시험객체에서 산출된 각 민감도 지수를 기초로 각 시험객체에 대한 변환 민감도 지수를 산출할 수 있다.

[0128] 하기 수학식 13은 k번째 시험객체 표본(specimen)의 i번째 모드(i-th mode) 주파수 응답 함수에 대한 변환 민감도 지수를 나타낸다.

[0129] [수학식 13]

$$\tilde{I}_{\theta,i} = \frac{I_{\theta,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{\theta,i}(k)}$$

$$\tilde{I}_{p,i} = \frac{I_{p,i}(k)}{\sum_{k=1}^3 I_{p,i}(k)}$$

[0130]

- [0131] 여기에서, $\dot{I}_{\theta,i}$ 는 각도(θ)에 대한 변환 민감도 지수, $\dot{I}_{p,i}$ 는 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 대한 변환 민감도 지수
- [0132] 이하에서는, 상기에서 설명한 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치를 실험적으로 구현하고 실험한 결과를 설명하기로 한다.
- [0133] 도 4a와 도 4b는 민감도 분석 장치를 실험적으로 구성한 예를 나타내는 도면이다.
- [0134] 도 4a는 제1 센서(120)로 로드 센서(load sensor)를 사용하여 실험적으로 구성한 예이고, 도 4b는 시험객체의 타측에 복수의 제2 센서(130)(#1, #2, #3, $\dots$, #7))를 배치하여 실험적으로 구성한 예이다.
- [0135] 하기 표 1은 가진기(140)를 통해 시험객체(110)에 가한 물리적 힘의 패턴, 즉 가진 패턴을 나타낸다. 가진기(140)는 표 1과 같은 랜덤(random) 패턴과 하모닉(harmonic) 패턴을 시험객체(110)에 가할 수 있다.
- [0136] [표 1]

Table 1. Profile for random excitation.

No.	Frequency (Hz)	Acceleration (g^2/Hz)
1	10	0.005
2	500	0.005

Table 2. Profile for harmonic excitation.

No.	Frequency (Hz)	Acceleration (g)
1	10	0.5
2	500	0.5

- [0137]
- [0138] 도 5a, 도 5b 및 도 5c는 각 시험객체(#1, #2, #3)의 주파수 응답 함수를 도식화한 도면이다.
- [0139] 복수의 제2 센서(130)를 통해 진동을 수집하는 경우, 민감도 분석기(150)는 각각의 제2 센서(130)에서 수집된 진동 신호를 기초로 각각의 제2 센서(130)에 대한 주파수 응답 함수를 산출하고, 산출된 주파수 응답 함수 값들을 더하여 시험객체(110)에 대한 주파수 응답 함수를 산출할 수 있다.
- [0140] 도 5a는 복수의 제2 센서(130)에서 산출된 주파수 응답 함수 값들을 더하여 산출된, 탄소섬유의 배열 각도(θ)가 0°인 1번째 탄소섬유강화플라스틱 표본(#1)의 주파수 응답 함수를 나타낸다. 도 5b는 복수의 제2 센서(130)에서 산출된 주파수 응답 함수 값들을 더하여 산출된, 탄소섬유의 배열 각도(θ)가 45°인 2번째 탄소섬유강화플라스틱 표본(#2)의 주파수 응답 함수를 나타내고, 도 5c는 복수의 제2 센서(130)에서 산출된 주파수 응답 함수 값들을 더하여 산출된, 탄소섬유의 배열 각도(θ)가 90°인 3번째 탄소섬유강화플라스틱 표본(#3)의 주파수 응답 함수를 나타낸다. 실선은 가진 패턴 즉 주파수 스펙트럼 패턴(p)이 랜덤 패턴일 때의 주파수 응답 함수 값을 나타내고, 점선은 주파수 스펙트럼 패턴(p)이 하모닉 패턴일 때의 주파수 응답 함수 값을 나타낸다.
- [0141] 도 6a와 도 6b는 배열 각도에 따른 시험객체의 공진주파수(natural frequency 또는 resonance frequency)를 도식화한 도면이고, 도 7a와 도 7b는 배열 각도에 따른 시험객체의 감쇠율(damping ratio)을 도식화한 도면이다.
- [0142] 민감도 분석기(150)는 도 5a, 도 5b 및 도 5c에서 산출된 주파수 응답 함수값과 수학식 7 및 수학식 2를 이용하여 1번째 탄소섬유강화플라스틱 표본(#1), 2번째 탄소섬유강화플라스틱 표본(#2) 및 3번째 탄소섬유강화플라스틱 표본(#3)에 대한 공진주파수와 감쇠율을 산출할 수 있다. 도면에 도시된 바와 같이 각 시험객체의 공진주파수와 감쇠율은 가진 패턴 즉 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따라 산출될 수 있다. 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)는 3개의 탄소섬유강화플라스틱 표본에서 산출된 공진주파수와 감쇠율을 이용하여 다른 각도(θ)의 공진주파수 추정값과 감쇠율 추정값을 산출할 수도 있다. 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)는 3개의 값을 좌표값으로 갖는 함수를 산출하여 다른 배열 각도(θ)의 공진주파수 추정값과 감쇠율 추정값을 산출할 수도 있다. 도 6a

와 도 6b는 다른 각도(θ)의 공진주파수 추정값을 도시한 도면이며, 도 7a와 도 7b는 다른 각도(θ)의 감쇠율 추정값을 도시한 도면이다.

- [0143] 민감도 분석기(150)는 수학식 11과 수학식 12를 이용하여 각도(θ)에 따른 민감도 지수와 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수를 산출한다. 민감도 분석기(150)는 산출된 각 민감도 지수를 기초로, 수학식 13을 이용하여 변환 민감도 지수를 산출한다.
- [0144] 도 8a와 도 8b는 각 시험객체(#1, #2, #3)의 제1 모드 주파수 응답 함수를 이용하여 산출된 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면이고, 도 9a와 도 9b는 각 시험객체(#1, #2, #3)의 제2 모드 주파수 응답 함수를 이용하여 산출된 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면이다.
- [0145] 도 10은 각 시험객체(#1, #2, #3)의 주파수 스펙트럼 패턴에 따른 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면이고, 도 11은 각 시험객체(#1, #2, #3)의 감쇠율 변환(scaled) 민감도 지수를 도식화한 도면이다. 도 8 내지 도 11는 변환 민감도 지수를 각 시험객체에 대해 퍼센트(%)로 산출하여 도시한 도면이다.
- [0146] 도 8 내지 도 11의 변환 민감도 지수 도면을 참조하면, 제1 모드에서 민감도 지수는 #1 시험객체(탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 0°인 탄소섬유강화플라스틱 표본)가 가장 크고, 탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 커질수록 급격히 감소한다. 제2 모드에서는 제1 모드와 반대의 경향이 나타난다.
- [0147] 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 변환 민감도 지수도 마찬가지로 제1 모드의 경우 #1 시험객체(탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 0°인 탄소섬유강화플라스틱 표본)가 가장 크다.
- [0148] 상기와 같은 결과를 바탕으로, 현재의 조건으로 외부 물리적 힘이 시험객체에 가해지는 경우, #1 시험객체(탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 0°인 탄소섬유강화플라스틱 표본)가 가장 구조적 안정성(structural rigidity)이 높은 것으로 판단될 수 있다. 그러나, 현재의 조건으로 가해지는 외부 물리적 힘의 변동(variation)에 대해서는 민감한 것으로 나타난다. 따라서, 현재 실험 조건과 동일한 외부 물리적 힘이 가해지는 제품에 대해서, 사용자는 #1 시험객체(탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 0°인 탄소섬유강화플라스틱 표본)를 사용하면 가장 구조적으로 안전한 제품을 얻을 수 있다고 판단할 수 있다. 다만, 현재 방향으로 가해지는 물리적 힘의 변동에 대해서는 #1 시험객체(탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 0°인 탄소섬유강화플라스틱 표본)가 민감하다는 것을 사용자는 설계시 주요 요소로 고려하여야 한다.
- [0149] 제1 모드에서 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 변환 민감도 지수를 살펴보면, #1 시험객체(탄소섬유의 배열 각도 (θ)가 0°인 탄소섬유강화플라스틱 표본)는 값이 큰 반면, 나머지 #2와 #3는 값이 낮은 것으로 나타난다. 이를 통해, #1 시험객체는 외부 물리적 힘의 스펙트럼 패턴의 작은 변화에도 주파수 응답 함수 값이 쉽게 변하는 것으로 판단될 수 있다. 즉, #1 시험객체를 이용하여 제품을 설계하는 경우 사용자는 외부 물리적 힘의 스펙트럼 변화를 주요 요소로 고려하여야 함을 알 수 있다. 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)가 상기와 같은 변환 민감도 지수 값을 시험객체별로 비교하여 자동으로 분석 결과를 출력할 수도 있다. 예를 들어, 상기에서 설명해 바와 같이, 복수의 시험객체 가운데 현재 실험 조건으로 가해지는 외부 물리적 힘에 가장 구조적 안정성이 높은 시험객체를 선정하여 결과로 출력할 수도 있다.
- [0150] 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법을 설명하는 흐름도이다.
- [0151] 도 12를 참조하면, 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 방법은 민감도 분석기(150)가 가진기(140)를 제어하여 가진 패턴을 설정한다(단계 S1210).
- [0152] 가진기(140)가 제어에 의해 시험객체(110)의 일측에 물리적 힘을 가하면(단계 S1220), 제1 센서(120)가 가진기(140)에 의해 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘을 측정하고(단계 S1230), 제2 센서(130)는 물리적 힘에 의해 유발된 시험객체(110)의 진동을 수집한다(단계 S1240).
- [0153] 일 실시예에서, 가진기(140)는 적어도 2개 이상의 가진 패턴으로 물리적 힘을 가하되, 가진 패턴은 랜덤(random) 패턴 및 하모닉(harmonic) 패턴을 포함하고 각 패턴은 동일한 주파수 대역을 가질 수 있다.
- [0154] 민감도 분석기(150)는 제1 센서(120)에서 측정된 물리적 힘 신호와 제2 센서(130)에서 수집된 진동 신호를 주파수 도메인 신호로 변환하여 시험객체(110)의 주파수 응답 함수를 산출한다(단계 S1250).
- [0155] 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)는 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴 및 재료의 배열된 각도를 포함하여 주파수 응답 함수를 산출할 수 있다. 예를 들어, 민감도 분석기(150)는 수학식 8을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출할 수 있다.

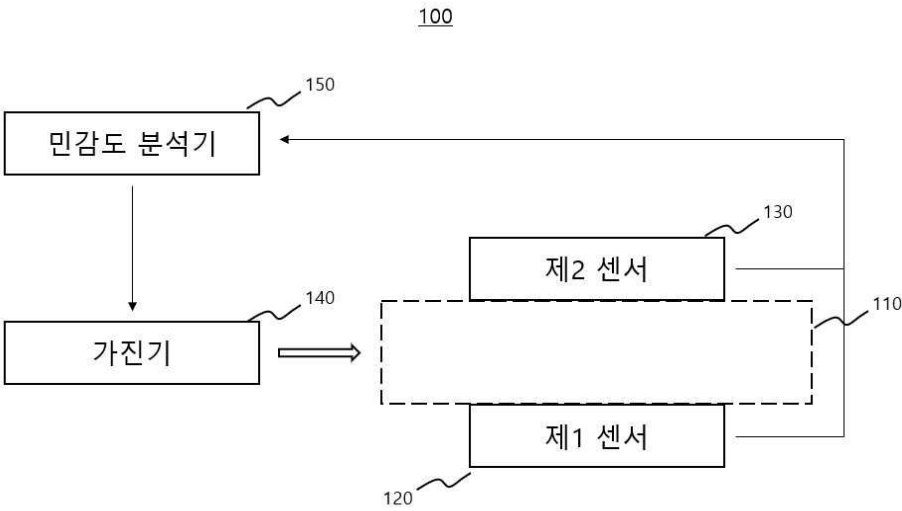
- [0156] 민감도 분석기(150)는 산출된 주파수 응답 함수를 기초로 시험객체(110)의 물리적 외부 변동(variable)에 대한 민감도 지수(sensitivity)를 산출한다(단계 S1260).
- [0157] 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)는 시험객체(110)에 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼(p) 패턴에 따른 민감도 지수를 산출하고, 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 산출한다. 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)는 수학식 11을 이용하여 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 산출하고, 수학식 12를 이용하여 주파수 스펙트럼(p) 패턴에 따른 민감도 지수를 산출할 수 있다.
- [0158] 민감도 분석기(150)는 재료가 배열된 각도가 다른 적어도 2개 이상의 시험객체에 대해 각각 가해지는 물리적 힘의 주파수 스펙트럼 패턴(p)에 따른 민감도 지수와 각도(θ)에 따른 민감도 지수를 산출하고, 각 시험객체에서 산출된 각 민감도 지수를 기초로 각 시험객체에 대한 변환(scaled) 민감도 지수를 산출한다. 일 실시예에서, 민감도 분석기(150)는 수학식 13을 이용하여 각 시험객체에 대한 변환 민감도 지수를 산출할 수 있다.
- [0159] 도 1 내지 도 12를 통해 설명된 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법은 컴퓨터에 의해 실행되는 애플리케이션이나 모듈과 같은 컴퓨터에 의해 실행 가능한 명령어를 포함하는 기록 매체의 형태로도 구현될 수도 있다.
- [0160] 컴퓨터 판독 가능 매체는 컴퓨터에 의해 액세스될 수 있는 임의의 가용 매체일 수 있고, 휘발성 및 비휘발성 매체, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함한다. 또한, 컴퓨터 판독가능 매체는 컴퓨터 저장 매체 및 통신 매체를 모두 포함할 수 있다. 컴퓨터 저장 매체는 컴퓨터 판독가능 명령어, 데이터 구조, 모듈 또는 기타 데이터와 같은 정보의 저장을 위한 임의의 방법 또는 기술로 구현된 휘발성 및 비휘발성, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함한다. 통신 매체는 전형적으로 컴퓨터 판독가능 명령어, 데이터 구조, 프로그램 모듈, 또는 반송파와 같은 변조된 데이터 신호의 기타 데이터, 또는 기타 전송 메커니즘을 포함하며, 임의의 정보 전달 매체를 포함한다.
- [0161] 모듈(module)이라 함은 명세서에서 설명되는 각각의 명칭에 따른 기능과 동작을 수행할 수 있는 하드웨어를 의미할 수도 있고, 또한 특정한 기능과 동작을 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램 코드를 의미할 수도 있고, 또한 특정한 기능과 동작을 수행시킬 수 있는 컴퓨터 프로그램 코드가 탑재된 전자적 기록 매체, 예컨대 프로세서를 의미할 수 있다.
- [0162] 이상 본 발명의 실시예로 설명하였으나 본 발명의 기술적 사상이 상기 실시예로 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범주에서 다양한 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치 및 이를 이용한 민감도 분석 방법으로 구현할 수 있다.

부호의 설명

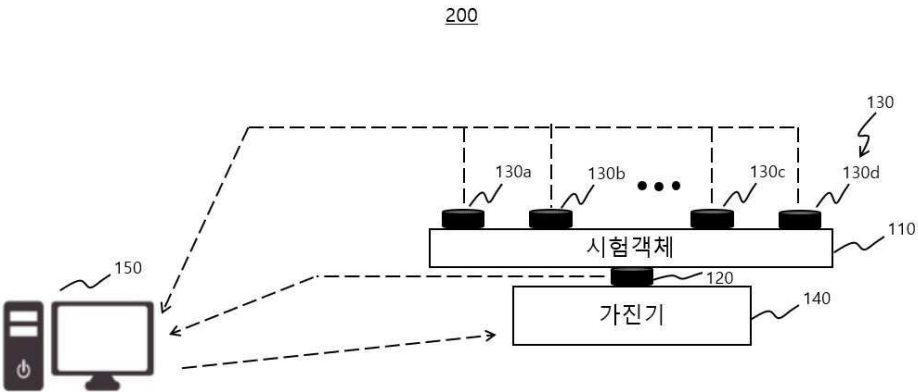
- [0163] 100 : 주파수 응답을 이용한 민감도 분석 장치
 110 : 시험객체
 120 : 제1센서
 130 : 제2센서
 140 : , 가진기
 150 : 민감도 분석기

도면

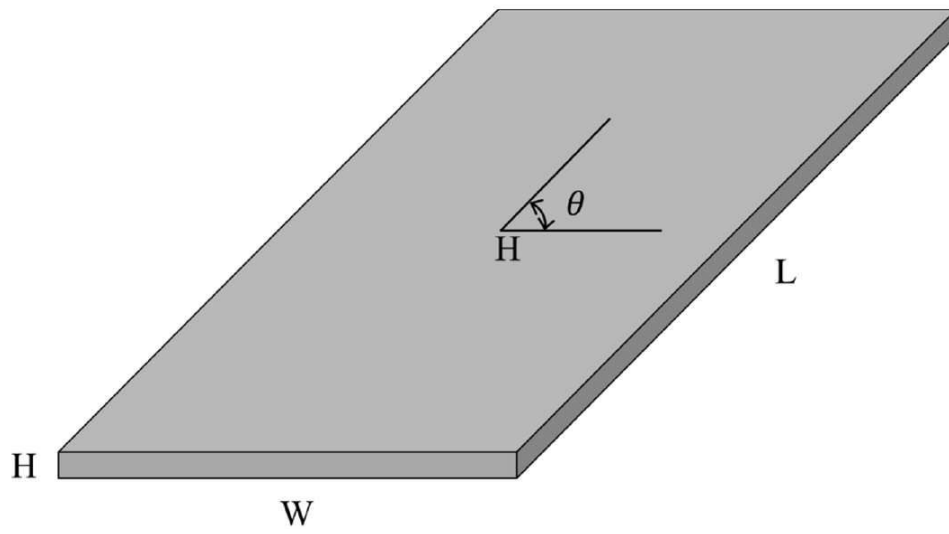
도면1



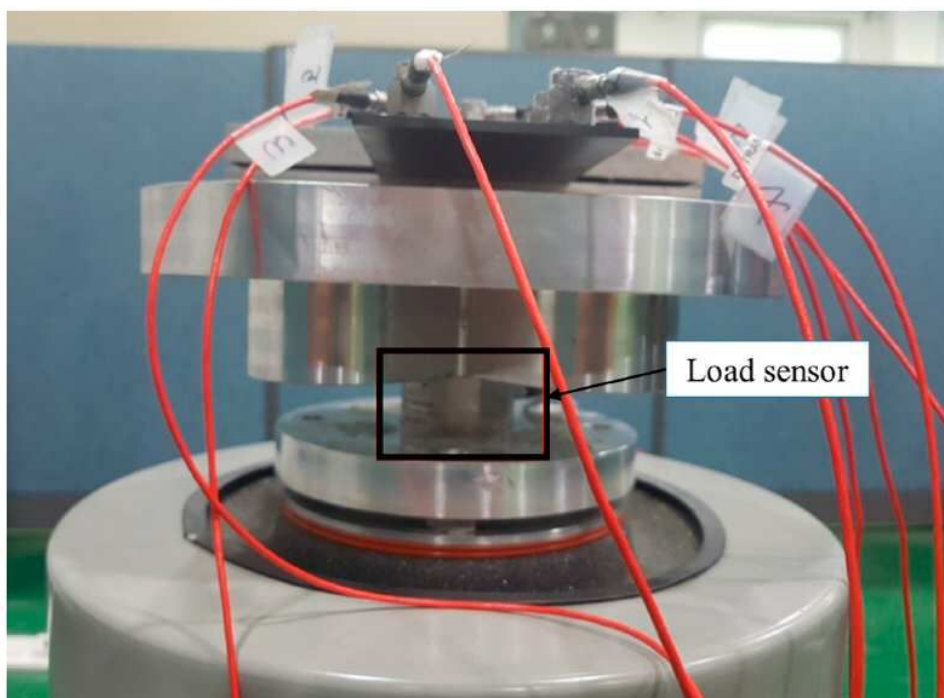
도면2



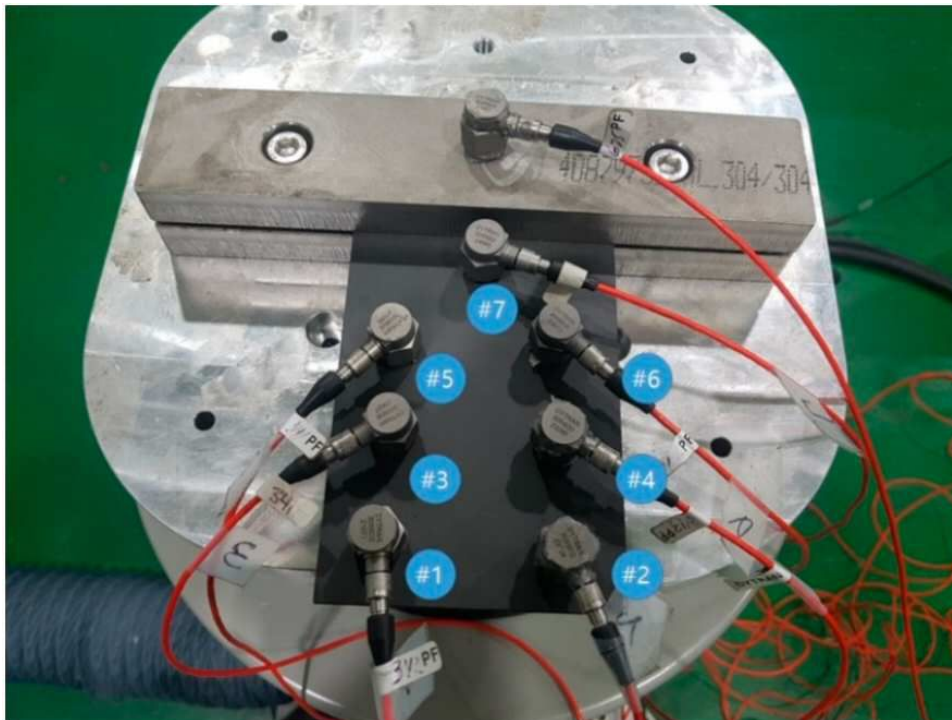
도면3



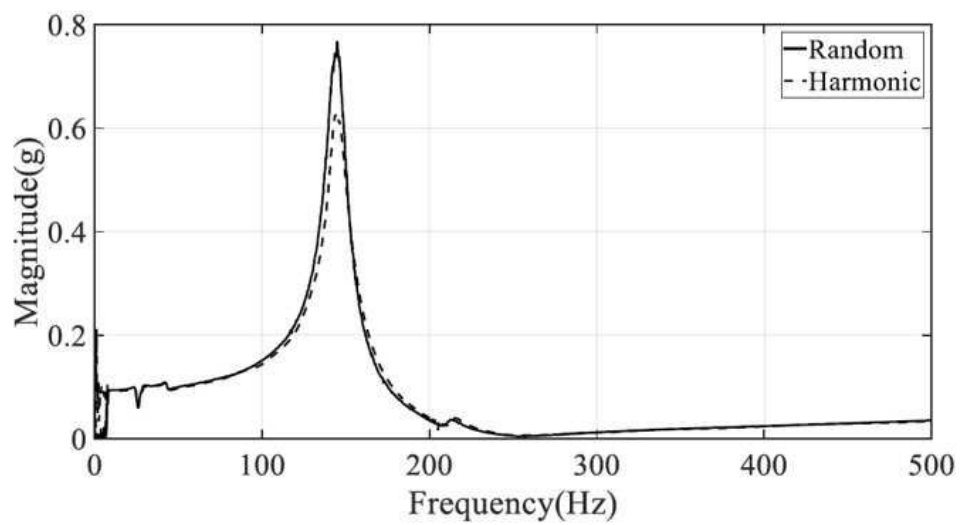
도면4a



도면4b

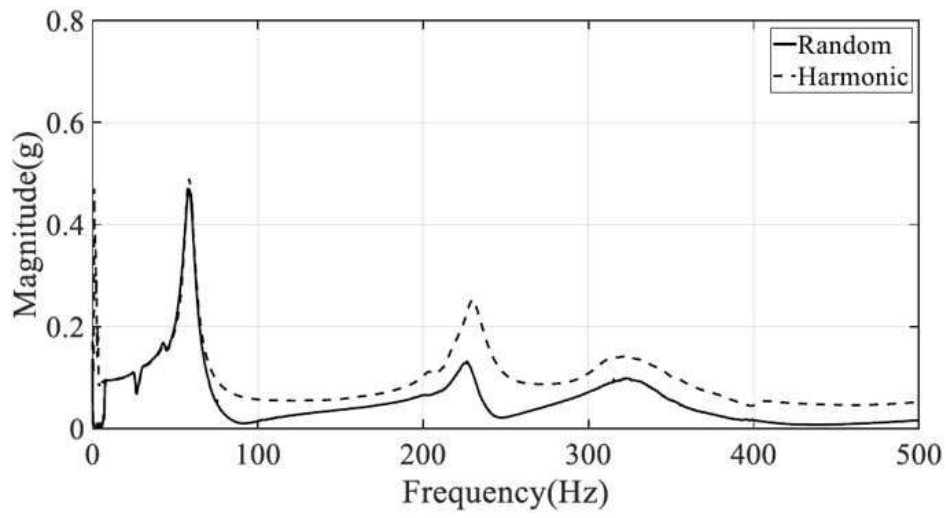


도면5a



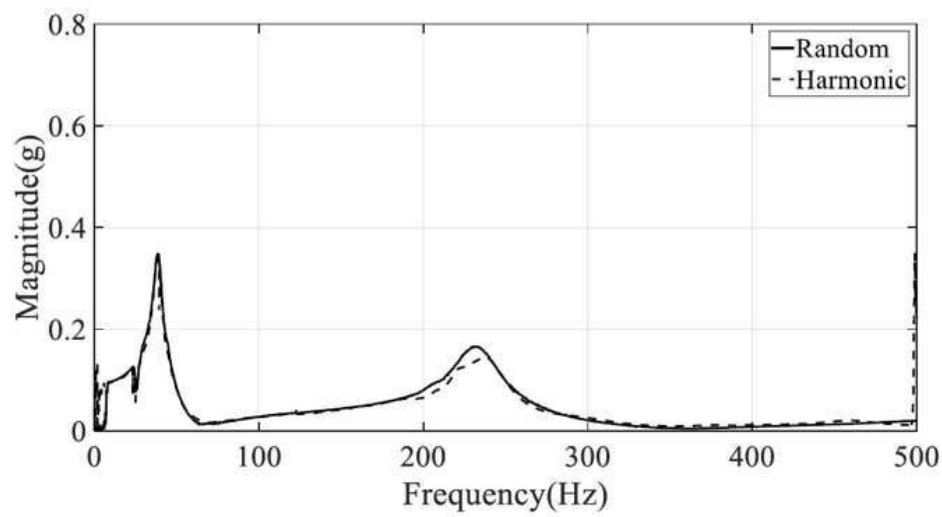
Summation of frequency response functions with CFRP specimen #1 (direction: 0°)

도면5b



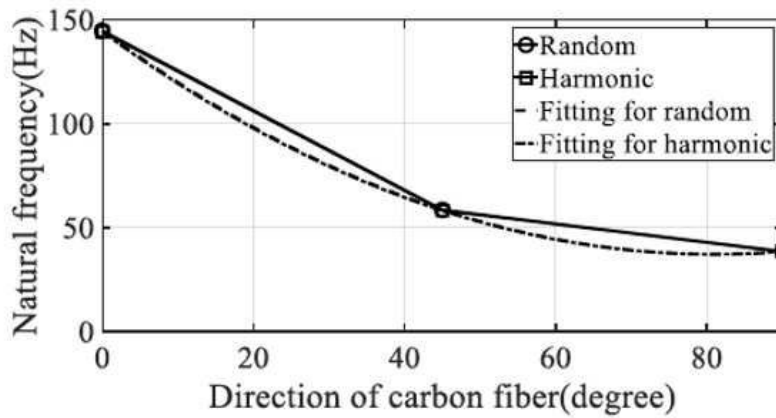
Summation of frequency response functions with CFRP specimen #2 (direction: 45°).

도면5c



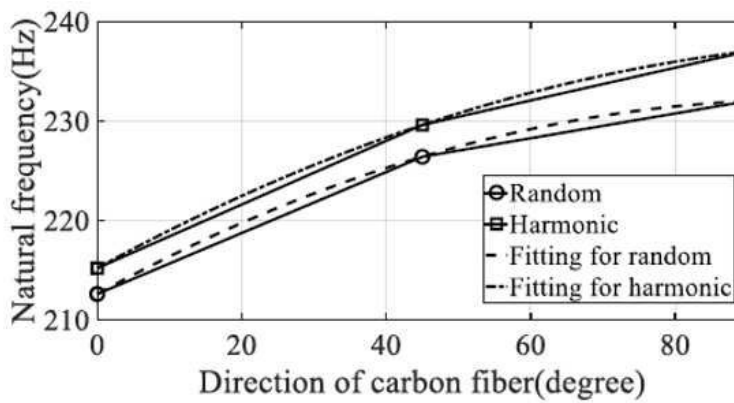
Summation of frequency response functions with CFRP specimen #3 (direction: 90°).

도면6a



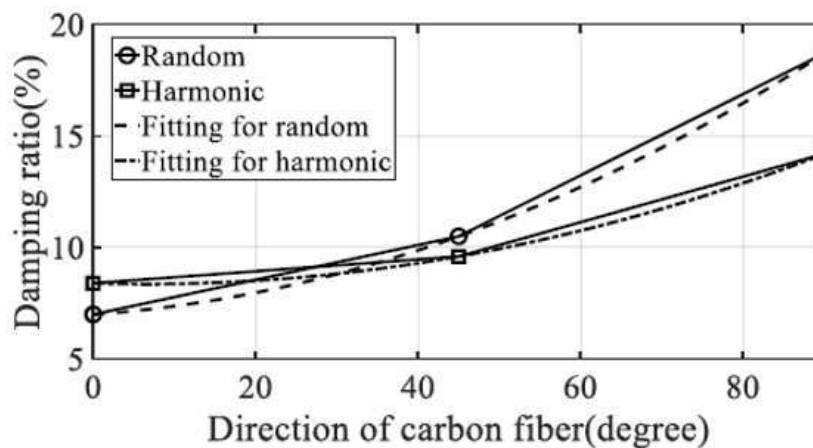
Variation of natural frequency over direction of carbon fiber. (a) First mode

도면6b



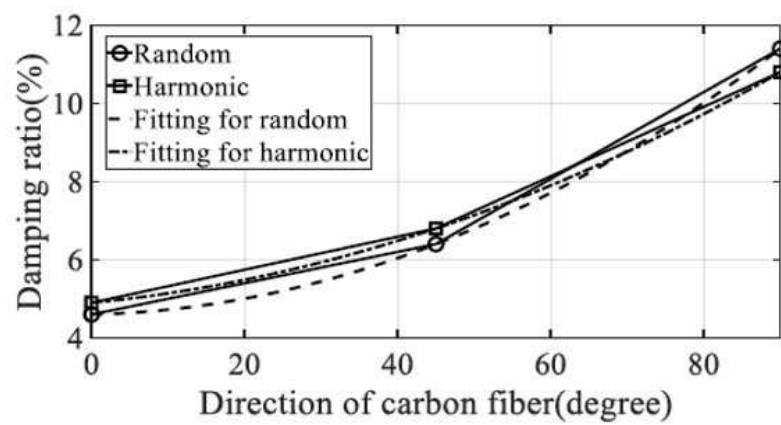
Variation of natural frequency over direction of carbon fiber. (b) second mode.

도면7a



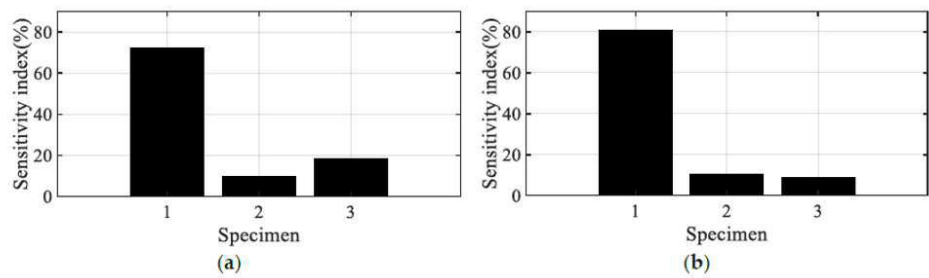
Variation of damping ratio over direction of carbon fiber. (a) First mode

도면7b



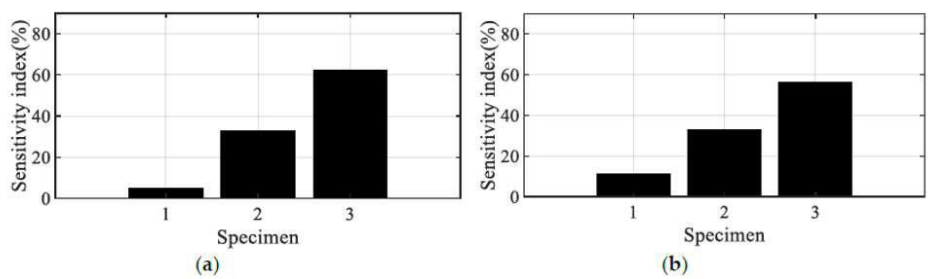
Variation of damping ratio over direction of carbon fiber. (b) second mode.

도면8



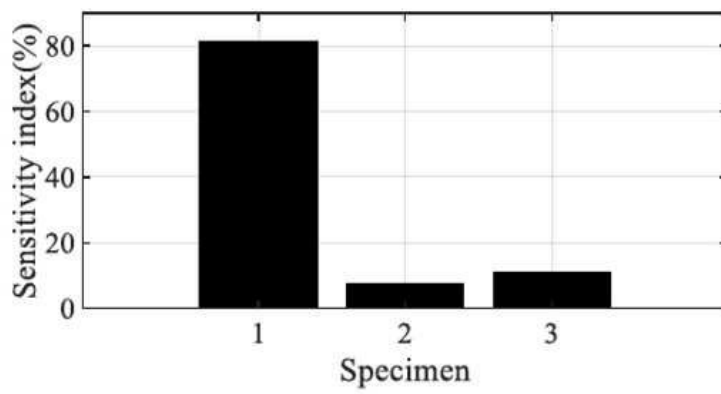
Scaled sensitivity index over the direction of carbon fiber in the first mode. (a) Random (b) Harmonic.

도면9



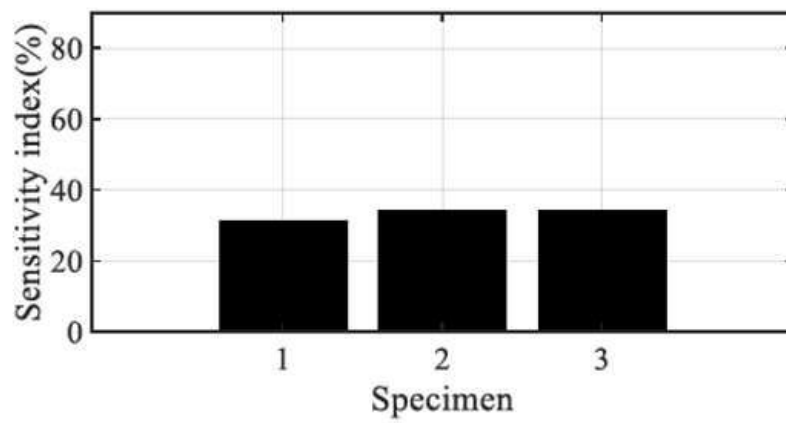
Scaled sensitivity index over the direction of carbon fiber in the second mode. (a) Random (b) Harmonic.

도면10



Scaled sensitivity index over the spectral loading pattern in the first mode.

도면11



Scaled sensitivity index of damping ratio in the second mode.

도면12

