



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0073778
(43) 공개일자 2023년05월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 29/24 (2006.01) G01N 27/02 (2006.01)
G01N 29/12 (2006.01) G01N 29/36 (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01) G01N 33/38 (2020.01)
(52) CPC특허분류
G01N 29/2437 (2013.01)
G01N 27/02 (2021.01)
(21) 출원번호 10-2021-0160515
(22) 출원일자 2021년11월19일
심사청구일자 2021년11월19일

(71) 출원인
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)
(72) 발명자
김정태
부산광역시 남구 오륙도로 85, 112동 2604호(용호동, 오륙도 에스케이뷰 아파트)
당, 석로이
부산광역시 남구 용소로 45(대연동, 부경대학교대연캠퍼스)
팜, 광광
부산광역시 남구 용소로 45, 320호(대연동, 부경대학교대연캠퍼스 환경해양관)
(74) 대리인
김정수

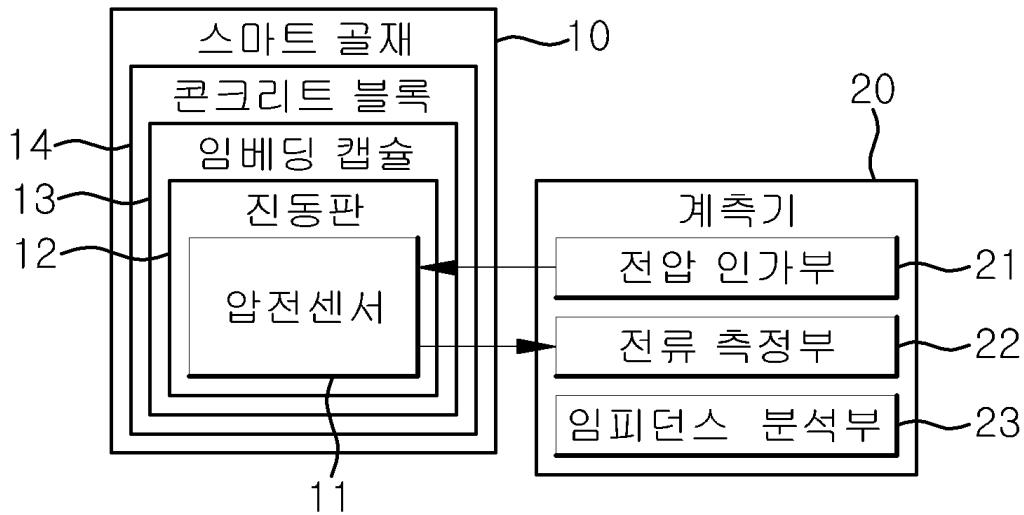
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치

(57) 요약

압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치가 개시된다. 콘크리트 모니터링 장치는, 압전센서가 진동판에 부착되고, 진동판이 임베딩 캡슐 내부에 삽입되어 고정되고, 임베딩 캡슐이 콘크리트 블록에 의하여 피복되어 생성된 스마트골재 및 압전센서를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 스마트골재의 진동에 따른 진동 응답을 측정하는 계측기를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 29/12 (2013.01)

G01N 29/36 (2013.01)

G01N 29/4472 (2013.01)

G01N 33/383 (2013.01)

G01N 2291/018 (2013.01)

G01N 2291/0232 (2013.01)

G01N 2291/0289 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1615011982

과제번호 163707

부처명 국토교통부

과제관리(전문)기관명 국토교통과학기술진흥원

연구사업명 국토교통기술촉진연구사업

연구과제명 텐던보호 콘크리트 균열 조기탐지용 센서일체형 스마트 골재 기술과 라즈베리파이 기반 멀티데이터 딥러닝 기술의 개발

기 여 율 1/1

과제수행기관명 부경대학교 산학협력단

연구기간 2021.04.01 ~ 2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치에 있어서,

상기 압전센서가 진동판에 부착되고, 상기 진동판이 임베딩 캡슐 내부에 삽입되어 고정되고, 상기 임베딩 캡슐이 콘크리트 블록에 의하여 피복되어 생성된 스마트골재; 및

상기 압전센서를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 상기 스마트골재의 진동에 따른 진동응답을 측정하는 계측기를 포함하는 콘크리트 모니터링 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 계측기는,

상기 압전센서에 미리 설정된 크기의 전압을 인가하는 전압인가부;

상기 전압인가부에 의한 전압 인가에 따라 상기 압전센서로부터 출력되는 전류의 크기를 측정하는 전류측정부; 및

상기 압전센서에 인가된 전압의 크기 및 상기 압전센서로부터 출력되는 전류의 크기를 이용하여 임피던스 응답을 측정하는 임피던스 분석부를 포함하는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 임피던스 분석부는 하기 수학적식을 이용하여 상기 임피던스 응답을 측정하는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \left\{ j\omega A_p \left[\hat{\epsilon}_{33}^T - \frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega) + 1} d_{31}^2 \hat{Y}_{11}^E \right] \right\}^{-1}$$

여기서, $V(\omega)$ 는 상기 압전센서에 인가된 전압이고, $I(\omega)$ 는 상기 압전센서로부터 출력되는 전류이고, $Z(\omega)$ 는 입력 전압 $V(\omega)$ 와 출력 전류 $I(\omega)$ 사이의 전기역학적 임피던스 신호이고, ω 는 가진 주파수이고, A_p 는 상기

압전센서의 형상 파라미터이고, $\hat{\epsilon}_{33}^T$ 는 콤플렉스 절연 상수이고, d_{31} 은 영응력시의 일방향 압전 상수이고, $\hat{Y}_{11}^E$ 는 영전기장시의 상기 압전센서의 탄성계수이고, $Z_a(\omega)$ 는 상기 압전센서의 역학적 임피던스이고, $Z_s(\omega)$ 는 상기 스마트골재와 상기 콘크리트 구조물의 커플링(coupling) 역학적 임피던스임

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 커플링 역학적 임피던스는 3 자유도 임피던스 계측 모델을 이용하여 결정되,

상기 3 자유도 임피던스 계측 모델은, 외부하중의 변화가 상기 압전센서의 인터페이스인 상기 진동판 및 상기

콘크리트 구조물의 구조강성(k_i , k_s) 및 감쇠계수(c_i , c_s)의 변화를 유발하는 것을 나타내는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 3 자유도 임피던스 예측 모델로부터, 상기 압전센서에 인가된 가진력 f_{PZT} 를 받는 상기 압전센서, 상기 스마트골재 및 상기 콘크리트 구조물의 진동응답에 대한 운동방정식은 하기 수학식으로 나타내어지는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

$$\begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 \\ 0 & m_{csa} & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_{csa} \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c & -c_c & 0 \\ -c_c & c_c + c_{csa} & -c_{csa} \\ 0 & -c_{csa} & c_{csa} + c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_{csa} \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & -k_c & 0 \\ -k_c & k_c + k_{csa} & -k_{csa} \\ 0 & -k_{csa} & k_{csa} + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_c \\ x_{csa} \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{pzt} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

여기서, m , k 및 c 는 각각 질량, 구조강성 및 감쇠계수이고, $\ddot{x}$, $\dot{x}$, x 는 질량 m 에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이고, 첨자 s , csa 및 c 는 각각 대상 콘크리트 구조물, 캡슐형 스마트골재(10) 및 압전센서(11)의 인터페이스(진동판(12))을 나타냄

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 커플링 역학적 임피던스는 상기 운동방정식으로부터 하기 수학식으로 산출되는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

$$Z_s = \frac{1}{i\omega} \left(K_{11} - \frac{K_{12}^2}{K_{11} + (K_{22} - K_{23}^2 / K_{33})} \right)$$

여기서, $K_{mn}(m, n=1 \sim 3)$ 은 상기 진동판, 상기 스마트골재 및 상기 콘크리트 구조물의 구조강성 파라미터를 포함하는 동적강성계수임

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 진동응답의 측정 주파수 대역을 100kHz 이하의 원하는 저주파 대역으로 설정하기 위하여, 상기 진동판의 재질, 형상 및 경계조건이 조정되는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로, 콘크리트는 과대하중 및 응력집중으로 인하여 내부 균열이 발생한다. 발생한 내부 균열은 콘크리트 표면으로 전파되며, 부식을 유발하는 환경적 영향으로 콘크리트 내부의 철근과 강연선의 파손을 유발한다. 그래서, 콘크리트 내부 손상의 발생을 조기에 감지하여 철근과 강연선의 부식을 예방하는 것은 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위하여 중요하다. 이에, 콘크리트 내부 손상을 민감하게 감지할 수 있는 기술이 필요하다.

[0003] 최근, 압전센서를 이용하여 콘크리트 양생 중에 강도변화 및 수화열 유발 응력변화를 모니터링하는 기술이 개발되고 있다. 이 기술을 콘크리트 내부 모니터링에 적용하기 위하여, 소형 콘크리트 블록에 PZT 압전소자를 임베딩하는 스마트골재(smart aggregate)형 센서가 개발된 바 있으며, 콘크리트 초기 강도의 실시간 모니터링 및 과대하중으로 유발된 내부손상 모니터링에 그 성능이 검증되었다.

[0004] 하지만, 압전센서 임베딩 스마트골재는 외부 하중에 의해 발생한 콘크리트 응력이 골재의 파괴강도를 초과하는 경우에 압전센서의 성능이 보장되지 않는다. 즉, 과대 하중 및 국부 응력집중으로 인하여 스마트골재가 파손되어 임베딩된 압전센서가 작동불능될 수 있으며, 이후의 콘크리트 파손 진전을 모니터링할 수 없는 제약이 있다.

[0005] 또한, 압전센서 임베딩 스마트골재는 임피던스 응답이 피복 콘크리트 블록의 강성에 좌우되기 때문에, 임베딩된 압전센서의 임피던스 응답이 수백 kHz 이상의 주파수 대역에서 측정되는 응답계측상의 제약이 있다. 이로 인하여, 고가(1,000만원 이상)의 고주파 대역 임피던스 측정기를 사용해야 하며, 이는 실제 구조물에 적용하는데 고가의 비용을 초래한다. 따라서, 100kHz 이하의 대역에서 임피던스 신호를 계측할 수 있는 AD5933과 같은 저가(3~5만원)의 임피던스 모듈을 사용할 수 있고, 미리 설정된 저주파수 대역에서 임피던스 응답을 계측할 수 있도록 기술 개선이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 대한민국등록특허공보 제10-1645622호(2016.07.29)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 압전센서가 임베딩(embedding)된 스마트골재를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 스마트골재의 진동에 따른 스마트골재의 진동응답을 측정하는 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치를 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명의 일 측면에 따르면, 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치가 개시된다.

[0009] 본 발명의 실시예에 따른 콘크리트 모니터링 장치는, 상기 압전센서가 진동판에 부착되고, 상기 진동판이 임베딩 캡슐 내부에 삽입되어 고정되고, 상기 임베딩 캡슐이 콘크리트 블록에 의하여 피복되어 생성된 스마트골재 및 상기 압전센서를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 상기 스마트골재의 진동에 따른 진동응답을 측정하는 계측기를 포함한다.

[0010] 상기 계측기는, 상기 압전센서에 미리 설정된 크기의 전압을 인가하는 전압인가부, 상기 전압인가부에 의한 전압 인가에 따라 상기 압전센서로부터 출력되는 전류의 크기를 측정하는 전류측정부 및 상기 압전센서에 인가된 전압의 크기 및 상기 압전센서로부터 출력되는 전류의 크기를 이용하여 임피던스 응답을 측정하는 임피던스 분석부를 포함한다.

[0011] 상기 임피던스 분석부는 하기 수학적식을 이용하여 상기 임피던스 응답을 측정한다.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \left\{ j\omega A_p \left[\hat{\epsilon}_{33}^T - \frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega) + 1} d_{31}^2 \hat{Y}_{11}^E \right] \right\}^{-1}$$

[0012] 여기서, $V(\omega)$ 는 상기 압전센서에 인가된 전압이고, $I(\omega)$ 는 상기 압전센서로부터 출력되는 전류이고, $Z(\omega)$ 는 입력 전압 $V(\omega)$ 와 출력 전류 $I(\omega)$ 사이의 전기역학적 임피던스 신호이고, ω 는 가진 주파수이고, A_p 는 상기 압전센서의 형상 파라미터이고, $\hat{\epsilon}_{33}^T$ 는 콤플렉스 절연 상수이고, d_{31} 은 영응력시의 일방향 압전 상수이고, $\hat{Y}_{11}^E$ 는 영전기장시의 상기 압전센서의 탄성계수이고, $Z_a(\omega)$ 는 상기 압전센서의 역학적 임피던스이고, $Z_s(\omega)$ 는 상기

스마트골재와 상기 콘크리트 구조물의 커플링(coupling) 역학적 임피던스이다.

[0014] 상기 커플링 역학적 임피던스는 3 자유도 임피던스 계측 모델을 이용하여 결정되되, 상기 3 자유도 임피던스 계측 모델은, 외부하중의 변화가 상기 압전센서의 인터페이스인 상기 진동판 및 상기 콘크리트 구조물의 구조강성(k_i , k_s) 및 감쇠계수(c_i , c_s)의 변화를 유발하는 것을 나타낸다.

[0015] 상기 3 자유도 임피던스 계측 모델로부터, 상기 압전센서에 인가된 가진력 f_{PZT} 를 받는 상기 압전센서, 상기 스마트골재 및 상기 콘크리트 구조물의 진동응답에 대한 운동방정식은 하기 수학식으로 나타내어진다.

$$[0016] \begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 \\ 0 & m_{csa} & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_{csa} \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c & -c_c & 0 \\ -c_c & c_c + c_{csa} & -c_{csa} \\ 0 & -c_{csa} & c_{csa} + c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_{csa} \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & -k_c & 0 \\ -k_c & k_c + k_{csa} & -k_{csa} \\ 0 & -k_{csa} & k_{csa} + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_c \\ x_{csa} \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{PZT} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

[0017] 여기서, m, k 및 c는 각각 질량, 구조강성 및 감쇠계수이고, $\ddot{x}$, $\dot{x}$, x 는 질량 m에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이고, 첨자 s, csa 및 c는 각각 대상 콘크리트 구조물, 캡슐형 스마트골재(10) 및 압전센서(11)의 인터페이스(진동판(12))을 나타낸다.

[0018] 상기 커플링 역학적 임피던스는 상기 운동방정식으로부터 하기 수학식으로 산출된다.

$$[0019] Z_s = \frac{1}{i\omega} \left(K_{11} - \frac{K_{12}^2}{K_{11} + (K_{22} - K_{23}^2 / K_{33})} \right)$$

[0020] 여기서, $K_{mn}(m, n=1 \sim 3)$ 은 상기 진동판, 상기 스마트골재 및 상기 콘크리트 구조물의 구조강성 파라미터를 포함하는 동적강성계수이다.

[0021] 상기 진동응답의 측정 주파수 대역을 100kHz 이하의 원하는 저주파 대역으로 설정하기 위하여, 상기 진동판의 재질, 형상 및 경계조건이 조정된다.

발명의 효과

[0022] 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치는, 압전센서가 임베딩(embedding)된 스마트골재를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 스마트골재의 진동에 따른 스마트골재의 진동응답을 측정함으로써, 콘크리트 구조물의 균열 발생 및 균열 진전을 장기적으로 감시할 수 있도록 압전센서의 신호감지 성능을 확보할 수 있고, 100kHz 이하의 미리 설정된 저주파수 대역에서 임피던스 응답을 계측할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 구성을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 스마트골재의 구성을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면.

도 3 및 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 스마트골재를 이용한 계측 개념을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치가 측정한 임피던스 응답의 예를 나타낸 도면.

도 6 내지 도 13은 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 성능검증을 위한 수치해석의 결과를 나타낸 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 본 명세서에서 사용되는 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "구성된다" 또는 "포함한다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 여러 구성 요소들, 또는 여러 단계들을 반드시 모두 포함하는 것으로 해석되지 않아야 하며, 그 중 일부 구성 요소들 또는 일부 단계들은 포함되지

않을 수도 있고, 또는 추가적인 구성 요소 또는 단계들을 더 포함할 수 있는 것으로 해석되어야 한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어 또는 소프트웨어로 구현되거나 하드웨어와 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

- [0025] 이하, 본 발명의 다양한 실시예들을 첨부된 도면을 참조하여 상술하겠다.
- [0026] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 구성을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면이고, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 스마트골재의 구성을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면이고, 도 3 및 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 스마트골재를 이용한 계측 개념을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면이고, 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치가 측정된 임피던스 응답의 예를 나타낸 도면이다. 이하, 도 1을 중심으로, 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치에 대하여 설명하되, 도 2 내지 도 5를 참조하기로 한다.
- [0027] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치는, 압전센서(11)가 임베딩(embedding)된 스마트골재(10) 및 압전센서(11)를 이용하여 콘크리트 내에서 스마트골재(10)의 진동에 따른 진동응답을 측정하는 계측기(20)를 포함하여 구성될 수 있다.
- [0028] 스마트골재(10)는 도 1에 도시된 바와 같이, 압전센서(11), 진동판(12), 임베딩 캡슐(13) 및 콘크리트 블록(14)을 포함하여 구성될 수 있다.
- [0029] 즉, 스마트골재(10)는 압전센서(11)가 진동판(12)에 부착되고, 압전센서(11)가 부착된 진동판(12)이 임베딩 캡슐(13) 내부에 삽입되어 고정되고, 임베딩 캡슐(13)이 콘크리트 블록(14)에 의하여 피복되어 생성될 수 있다. 여기서, 진동판(12)은 압전센서(11)의 인터페이스 역할을 수행할 수 있다.
- [0030] 예를 들어, 도 2를 참조하면, 우선, 도 2의 (a)와 같이 압전센서(11)가 알루미늄 진동판(12)에 부착될 수 있다. 여기서, 압전센서(11)는 콘크리트 구조물 내부의 응력 변화가 유발하는 국부 동적응답 변화를 계측하는 장치로서, PZT(lead zirconate titanate) 패치(patch)일 수 있다. 다음으로, 도 2의 (b)와 같이, 압전센서(11)가 부착된 알루미늄 진동판(12)이 알루미늄 임베딩 캡슐(13) 내부에 삽입되어 고정될 수 있다. 여기서, 알루미늄 진동판(12)은 4개의 모서리 단부가 알루미늄 임베딩 캡슐(13)의 내부벽에 고정되도록 부착될 수 있다. 이때, 알루미늄 진동판(12)은 단부 고정 경계조건에서 휨 진동이 가능하도록 알루미늄 임베딩 캡슐(13) 내부에 설치될 수 있다. 다음으로, 도 3의 (c)와 같이 알루미늄 임베딩 캡슐(13)이 콘크리트 블록(14) 내부에 설치되어 스마트골재(10)가 형성될 수 있다. 여기서, 콘크리트 블록(14)은 알루미늄 임베딩 캡슐(13)을 피복하여 보호하는 역할을 수행하고, 동시에 골재의 역할을 수행하여, 콘크리트 구조물과 하중 및 변형의 거동이 일체화될 수 있다.
- [0031] 스마트골재(10)의 하중 및 변형의 거동이 변화하면, 이는 임베딩된 압전센서(11)의 인터페이스인 진동판(12)의 진동특성의 변화로 감지될 수 있다. 따라서, 진동판(12)의 재질, 형상 및 경계조건을 조정하여 임피던스 응답의 측정 주파수 대역을 100kHz 이하의 원하는 저주파 대역으로 설정할 수 있다.
- [0032] 계측기(20)는 스마트골재(10)에 임베딩된 압전센서(11)를 이용하여 축하중을 받는 콘크리트 구조물 내에서 스마트골재(10)의 하중 및 변형의 거동 변화에 따른 임피던스 응답을 측정한다.
- [0033] 즉, 계측기(20)는 압전센서(11)에 미리 설정된 크기의 전압을 인가하고, 전압 인가에 따라 출력되는 전류의 크기를 측정하고, 측정된 전류의 크기를 이용하여 임피던스 응답을 측정할 수 있다.
- [0034] 다시, 도 1을 참조하면, 계측기(20)는 전압인가부(21), 전류측정부(22) 및 임피던스 분석부(23)를 포함할 수 있다.
- [0035] 전압인가부(21)는 압전센서(11)에 미리 설정된 크기의 전압을 인가한다.
- [0036] 전류측정부(22)는 전압인가부(21)에 의한 전압 인가에 따라 압전센서(11)로부터 출력되는 전류의 크기를 측정한다.
- [0037] 임피던스 분석부(23)는 압전센서(11)에 인가된 전압의 크기 및 압전센서(11)로부터 출력되는 전류의 크기를 이용하여 임피던스 응답을 측정한다.
- [0038] 예를 들어, 도 3은 압축하중을 받는 콘크리트 구조물 내에 배치된 스마트골재(10)의 임피던스 응답의 계측 개념을 보여준다. 도 3을 참조하면, 외부 하중의 변화 $N+\Delta N$ 은 콘크리트 구조물의 응력 및 변형의 거동 변화를 유발하고, 이는 스마트골재(10)의 응력 및 변형의 거동 변화를 일으킨다. 따라서, 스마트골재(10)의 응력 및 변형의

거동 변화를 임피던스 응답의 변화로 감지하여, 스마트골재(10)의 응력 및 변형의 거동 변화 및 이를 유발하는 외력의 변화가 추정될 수 있다.

[0039] 한편, 도 4는 3 자유도 임피던스 예측 모델의 예를 나타낸다. 도 4를 참조하면, 외부하중의 변화 ΔN 은 PZT 인터페이스(진동판(12)) 및 콘크리트 구조물의 구조강성(k_i , k_s) 및 감쇠계수(c_i , c_s)의 변화를 유발한다.

[0040] 압전센서(11)에 전압 $V(\omega)$ 가 인가되면, 역압전 효과로 가진력 $F(\omega)$ 이 발생하며, 이 가진력이 스마트골재(10)에 작용하여 진동판(12)의 진동변형을 유발한다. 이와 동시에, 유발된 진동변형은 압전효과를 통해 전류 $I(\omega)$ 로 출력되며, 하기 수식과 같이, 입력 전압 $V(\omega)$ 와 출력 전류 $I(\omega)$ 사이의 전기역학적 임피던스 신호 $Z(\omega)$ 가 측정될 수 있다.

수학식 1

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \left\{ j\omega A_p \left[\hat{\epsilon}_{33}^T - \frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega)+1} d_{31}^2 \hat{Y}_{11}^E \right] \right\}^{-1}$$

[0041]

[0042] 여기서, ω 는 가진 주파수이고, A_p 는 압전센서(11)의 형상 파라미터이고, $\hat{\epsilon}_{33}^T$ 는 콤플렉스 절연 상수이고, d_{31} 은

영응력시의 일방향 압전 상수이고, $\hat{Y}_{11}^E$ 는 영전기장시의 압전센서(11)의 탄성계수이고, $Z_a(\omega)$ 는 압전센서(11)의 역학적 임피던스이고, $Z_s(\omega)$ 는 스마트골재(10)와 콘크리트 구조물의 커플링(coupling) 역학적 임피던스이다. 이 커플링 역학적 임피던스는 도 4에 도시된 바와 같은 3 자유도 임피던스 모델에서 결정될 수 있다.

[0043] 도 4의 3 자유도 임피던스 예측 모델로부터, 압전센서(11)에 인가된 정현파 가진력 f_{PZT} 를 받는 압전센서(11), 스마트골재(10) 및 콘크리트 구조물의 진동응답에 대한 운동방정식은 하기 수학적식으로 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$\begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 \\ 0 & m_{csa} & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_{csa} \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c & -c_c & 0 \\ -c_c & c_c + c_{csa} & -c_{csa} \\ 0 & -c_{csa} & c_{csa} + c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_{csa} \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & -k_c & 0 \\ -k_c & k_c + k_{csa} & -k_{csa} \\ 0 & -k_{csa} & k_{csa} + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_c \\ x_{csa} \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{PZT} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

[0044]

[0045] 여기서, m , k 및 c 는 각각 질량, 구조강성 및 감쇠계수이고, $\ddot{x}$, $\dot{x}$, x 는 질량 m 에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이고, 첨자 s , csa 및 c 는 각각 대상 콘크리트 구조물, 캡슐형 스마트골재(10) 및 압전센서(11)의 인터페이스(진동판(12))을 나타낸다.

[0046] 수학적식 2로부터, 스마트골재(10)와 콘크리트 구조물의 커플링 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 는 하기 수학적식으로 산출될 수 있다.

수학식 3

$$Z_s = \frac{1}{i\omega} \left(K_{11} - \frac{K_{12}^2}{K_{11} + (K_{22} - K_{23}^2 / K_{33})} \right)$$

[0047]

[0048] 여기서, K_{mn} ($m, n=1 \sim 3$)은 압전센서(11)의 인터페이스(진동판(12)), 캡슐형 스마트골재(10) 및 대상 콘크리트 구조물의 구조강성 파라미터를 포함하는 동적강성계수이다.

- [0049] 콘크리트 구조물에 작용하는 하중 N 이 $N+\Delta N$ 으로 변화하면, 압전센서(11)가 매립된 스마트골재(10)에 작용하는 축하중 F 는 $F+\Delta F$ 로 변화한다. 이에 따라, 수학적 식 3과 같이, 콘크리트 구조물과 스마트골재(10)의 강성과 감쇠의 변화를 유발하여 커플링 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 의 변화를 발생시킨다. 따라서, 스마트골재(10)의 축하중 변화는 도 5에 도시된 바와 같이, 임피던스 응답의 주파수와 크기를 변화시키며, 수학적 식 1의 임피던스 신호 $Z(\omega)$ 의 변화로부터 산출될 수 있다.
- [0050] 즉, 전술한 수학적 식 1 내지 수학적 식 3을 이용하여, 압전센서(11)가 매립된 스마트골재(10)의 임피던스 응답으로부터 콘크리트 구조물에 작용하는 하중의 변화 및 국부 응력의 변화가 추정될 수 있다.
- [0051] 도 6 내지 도 13은 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트골재를 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 성능검증을 위한 수치해석의 결과를 나타낸 도면이다.
- [0052] 성능 검증을 위하여 도 6에 도시된 바와 같은 제원을 갖는 캡슐형 스마트골재 모델이 선정되었다. 즉, 도 6을 참조하면, 20x25x2mm 알루미늄 판에 0.1mm 두께의 부착층으로 10x15x0.51mm PZT 패치를 부착하여 PZT 인터페이스(압전센서(11)가 부착된 진동판(12))를 생성하였다. 그리고, 가로 24mm, 세로 29mm, 깊이 11mm 및 두께 2mm의 알루미늄 캡슐의 중간 높이에 진동판(12)의 4개 모서리 단부가 알루미늄 캡슐의 벽에 고정되도록 부착하여 압전센서(11)가 부착된 진동판(12)을 임베딩 캡슐(13)에 장착하였다. 그리고, 가로 44mm, 세로 49mm 및 높이 31mm의 콘크리트 블록(14)에 콘크리트 블록(14)의 무게중심에 대칭으로 임베딩 캡슐(13)을 매립하여 캡슐형 스마트골재(10)를 생성하였다. 최종적으로, 생성된 캡슐형 스마트골재(10)는 임베딩 캡슐(13)을 두께 10mm의 콘크리트로 피복하는 형태를 가진다.
- [0053] 스마트골재(10)의 주파수 대역별 임피던스 응답특성 분석을 위하여, 도 7의 (a)와 같이, 스마트골재 모델과 캡슐형 스마트골재 모델을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 도 7의 (a)의 스마트골재(SA)는 기존에 제안된 모델로서, 도 7의 (b)의 캡슐형 스마트골재(CSA)와 임피던스 예측 성능의 비교를 위하여 선택되었다. 여기서, 스마트골재(SA)는 직경 26mm 및 높이 26mm의 콘크리트 실린더의 중간에 10x10x1.0mm PZT 패치와 이를 피복하는 0.5mm 에폭시층을 삽입한 것으로, 축하중(axial loading) 하에서 임피던스 응답을 분석하였다.
- [0054] 그리고, 본 발명의 실시예에 따른 캡슐형 스마트골재(CSA)는 제원이 도 7의 (b)와 같고, 축하중(axial loading), 횡하중(lateral loading) 및 종방향하중(longitudinal loading) 하의 캡슐형 스마트골재(CSA)의 거동에 대응하는 임피던스 응답을 분석하였다. 여기서, 유한요소모델에 사용된 콘크리트, 알루미늄, 접착제, 에폭시 및 PZT 패치의 재료물성은 하기 표 1과 같다.

표 1

Properties	Concrete	Aluminum	Glue	Epoxy	PZT 5A
Young's modulus (GPa)	29.91	70	6	0.74	62.1
Poisson's ratio	0.20	0.33	0.38	0.3	0.35
Mass density (kg/m ³)	2400	2700	1700	1090	7750
Compressive strength (MPa)	35	-	-	32.3	-
Tensile strength (MPa)	3.5	-	-	3.23	-

- [0055]
- [0056] 모든 방향의 압축하중은 응력(압력단위)로 모사되었으며, 7단계 하중 시나리오로서, $\sigma_1=0\text{MPa}$, $\sigma_2=5.0\text{MPa}$, $\sigma_3=10.0\text{MPa}$, $\sigma_4=15.0\text{MPa}$, $\sigma_5=20.0\text{MPa}$, $\sigma_6=25.0\text{MPa}$, $\sigma_7=30.0\text{MPa}$ 이 선정되었다.
- [0057] 도 8의 (a)는, 압축하중 $\sigma_1=0$ (0 응력)하의 스마트골재(SA) 내부의 PZT 패치로부터 측정된 임피던스 응답 신호이다. 주파수 범위 100~300kHz에서 매 1kHz 당 임피던스 응답이 측정되었다. 임피던스 응답의 1차 공진주파수는 200kHz 근처에서 발생하였으며, 2차 공진주파수는 240Hz 근처에서 발생하였다. 공진주파수 대역이 100kHz를 초과하며, 저주파 임피던스 모듈(AD5933)을 사용하여 예측할 수 없는 임피던스 응답이었다.
- [0058] 도 8의 (b)는, 압축하중 $\sigma_1=0$ (0 응력)하의 캡슐형 스마트골재(CSA) 내부의 PZT 인터페이스(진동판)에서 측정된 임피던스 응답 신호이다. 주파수 범위 5~95kHz에서 매 1kHz 당 임피던스 응답이 측정되었다. 임피던스 응답의 1차 공진주파수는 30kHz 근처에서 발생하였다. 이 주파수는 PZT 인터페이스(진동판)의 1차 휨진동 주파수에 해당한다. 공진주파수 대역이 100kHz 이내이며, 저주파 임피던스 모듈(AD5933)을 사용하여 예측이 가능하였다.
- [0059] 도 9의 (a)는, 압축하중 $\sigma_1\sim\sigma_7$ 하의 스마트골재(SA)의 임피던스 응답이다. 압축응력 증가에 따라 임피던스 응

답 주파수가 감소하였다.

- [0060] 한편, 도 9의 (b) 내지 (d)는, 동일한 응력을 축방향, 횡방향 및 종방향으로 받는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 응답이다. 축방향 압축응력 증가에 따라 임피던스 주파수가 감소하였으나, 이 외의 두 경우에는 임피던스 주파수가 증가하였다.
- [0061] 도 10과 같이, 스마트골재(SA)와 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 응답의 변화를 RMSD(root-mean-square-deviation) 분석하였다. 7단계 압축하중 시나리오의 각 경우마다 4회 측정된 임피던스 신호의 평균 및 표준편차를 산정하였다.
- [0062] 도 10의 (a)는 압축응력 $\sigma_1 \sim \sigma_7$ 하의 스마트골재(SA)의 임피던스 신호의 RMSD값의 변화이다. RMSD 크기가 압축응력의 크기에 선형으로 비례하며, $\sigma_1=0$ 과 최대응력 $\sigma_7=30\text{MPa}$ 사이에 RMSD는 8.91% 변화하였다.
- [0063] 한편, 도 10의 (b) 내지 (d)는 동일한 압축응력을 축방향, 횡방향, 종방향으로 받는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 신호의 RMSD값의 변화이다. RMSD 크기가 압축응력의 크기에 선형으로 비례한다. 압축응력이 0에서 30MPa로 변할 때, 축방향으로 거동하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 RMSD는 6.9% 변화하였고(도 10의 (b)), 횡방향으로 거동하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 RMSD는 21.94% 변화하였고(도 10의 (c)), 종방향으로 거동하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 RMSD는 28.11% 변화하였다(도 10의 (d)).
- [0064] 전체적으로, 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 신호의 압축응력 변화에 대한 민감도가 스마트골재(SA)에 비하여 월등히 높았다. 도 9 및 도 10에 도시된 결과로부터, 캡슐형 스마트골재(CSA)가 100kHz 이하의 저주파 대역에서 응력변화에 민감한 임피던스 응답을 측정할 수 있음을 알 수 있다.
- [0065] 콘크리트 구조물의 압축응력 변화를 구조물 내부에 설치된 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 응답의 변화로 감지할 수 있는지를 수치해석으로 분석하였다.
- [0066] 도 11과 같은 캡슐형 스마트골재(CSA)가 설치된 콘크리트 구조물 유한요소모델을 생성하였다. 여기서, 생성된 유한요소모델에 사용된 콘크리트, 알루미늄, 접착제, 에폭시 및 PZT 패치의 재료물성은 전술한 표 1과 같다.
- [0067] 도 11의 (a)는 캡슐형 스마트골재(CSA)가 설치된 콘크리트 구조물 모델이며, 이의 체원은 도 6 및 도 7의 (b)의 캡슐형 스마트골재와 일치한다. 31x44x49mm 크기의 캡슐형 스마트골재(CSA)는 150x150x150mm 크기의 콘크리트 구조물 중앙에 위치한다.
- [0068] 도 11의 (b)와 같이, 콘크리트 구조물은 축하중(axial loading), 횡하중(lateral loading) 및 종방향하중(longitudinal loading)을 각각 받아 하중 및 변형의 거동을 하며, 내부의 캡슐형 스마트골재(CSA)는 콘크리트 구조물과 일체로 거동하도록 모델링되었다.
- [0069] 도 12와 같이, 콘크리트 구조물의 다방향 하중(축하중: axial loading, 횡하중: lateral loading, 종방향하중: longitudinal loading) 거동이 유발하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 응답을 비교하였다.
- [0070] 도 12의 (a) 내지 (c)와 같이, 캡슐형 스마트골재(CSA)는 3방향 하중 거동 하에서 동일한 1차 공진주파수 29kHz를 발생하였다. 각 방향별 임피던스 응답의 감도는 약간의 차이(2500~2900 Ω)가 있다.
- [0071] 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 응답은 횡방향하중의 변화에 가장 민감하게 반응하였으며, 축하중의 변화에 대한 민감도가 가장 낮았다. σ_1 로부터 σ_7 로 압축응력이 증가하는 경우, 임피던스 응답의 공진주파수는 축하중 거동의 경우는 증가하였으나, 이 외의 경우에는 감소하였다.
- [0072] 도 13의 (a) 내지 (c)는 콘크리트 구조물의 다방향 하중거동이 유발하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 응답의 특징을 분석한 결과로서, 동일한 압축응력($\sigma_1 \sim \sigma_7$)을 축방향, 횡방향 및 종방향으로 받는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 신호의 RMSD값의 변화를 나타낸다.
- [0073] 압축응력이 0에서 30MPa로 변할 때, 축방향으로 거동하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 RMSD는 9.45% 변화하였고(도 13의 (a)), 횡방향으로 거동하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 RMSD는 26.47% 변화하였고(도 13의 (b)), 종방향으로 거동하는 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 RMSD는 19.56% 변화하였다(도 13의 (c)).
- [0074] 콘크리트 구조물 내부에 위치한 캡슐형 스마트골재(CSA)의 임피던스 신호의 민감도는 횡방향 및 종방향 하중 거동의 경우에 높았다. 도 12 및 도 13에 도시된 결과로부터, 캡슐형 스마트골재(CSA)가 100kHz 이하의 저주파 대역에서 콘크리트 구조물의 응력변화에 민감한 임피던스 응답을 측정할 수 있음을 알 수 있다.
- [0075] 한편, 전술된 실시예의 구성 요소는 프로세스적인 관점에서 용이하게 파악될 수 있다. 즉, 각각의 구성 요소는

각각의 프로세스로 파악될 수 있다. 또한 전술된 실시예의 프로세스는 장치의 구성 요소 관점에서 용이하게 파악될 수 있다.

[0076] 또한 앞서 설명한 기술적 내용들은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예들을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 하드웨어 장치는 실시예들의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

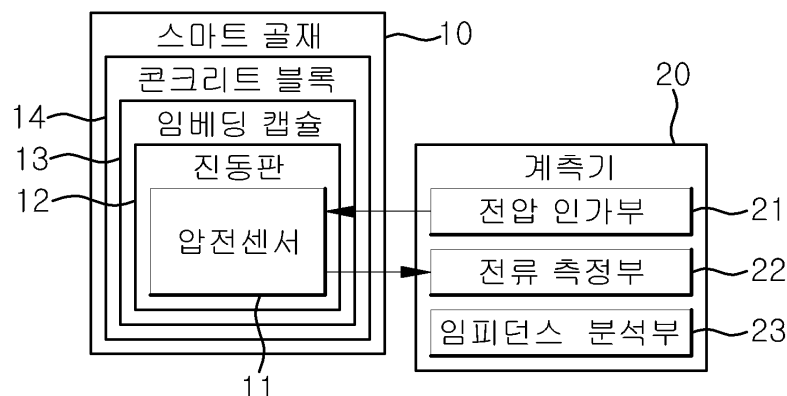
[0077] 상기한 본 발명의 실시예는 예시의 목적을 위해 개시된 것이고, 본 발명에 대한 통상의 지식을 가지는 당업자라면 본 발명의 사상과 범위 안에서 다양한 수정, 변경, 부가가 가능할 것이며, 이러한 수정, 변경 및 부가는 하기의 특허청구범위에 속하는 것으로 보아야 할 것이다.

부호의 설명

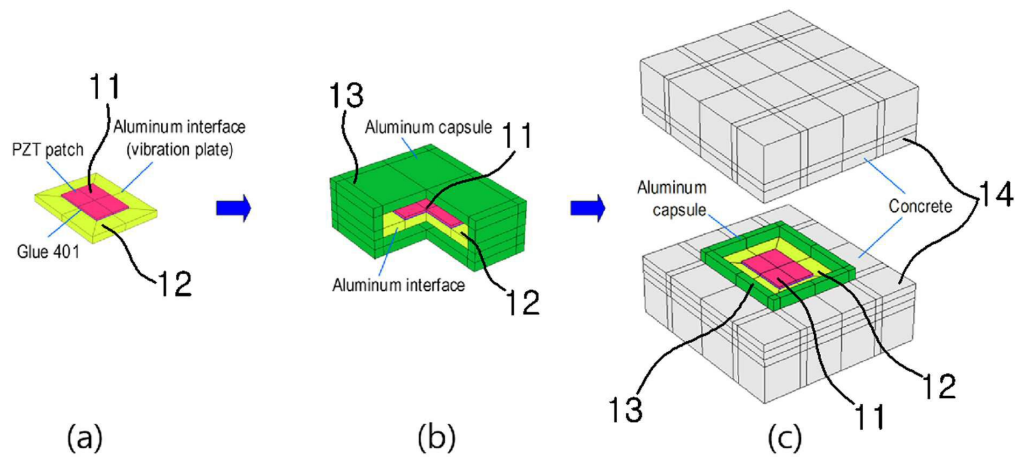
[0078] 10: 스마트골재
11: 압전센서
12: 진동판
13: 임베딩 캡슐
14: 콘크리트 블록
20: 계측기
21: 전압인가부
22: 전류측정부
23: 임피던스 분석부

도면

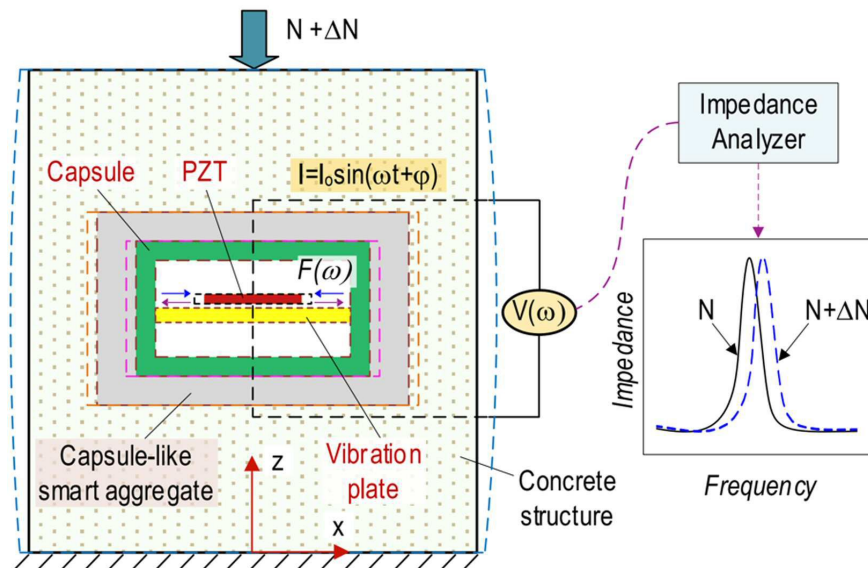
도면1



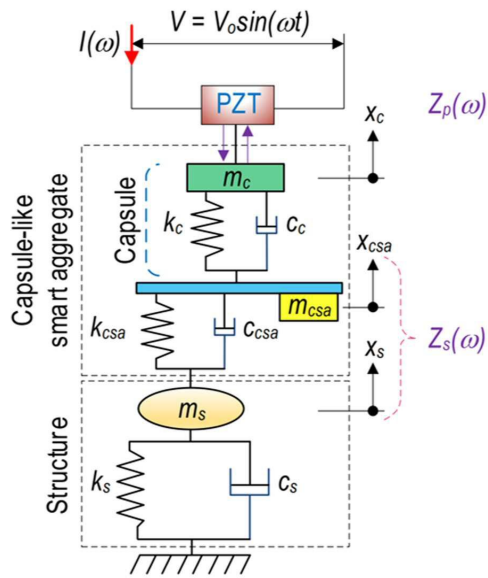
도면2



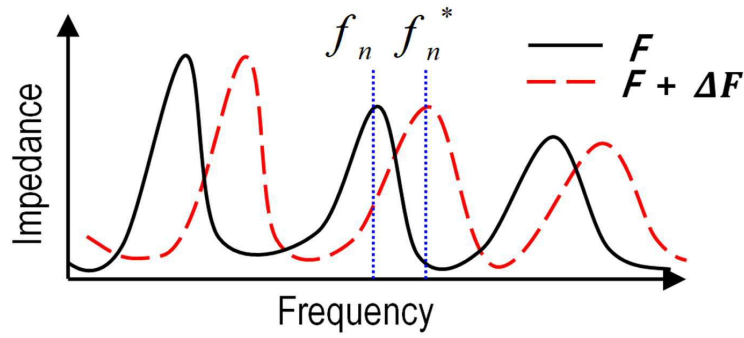
도면3



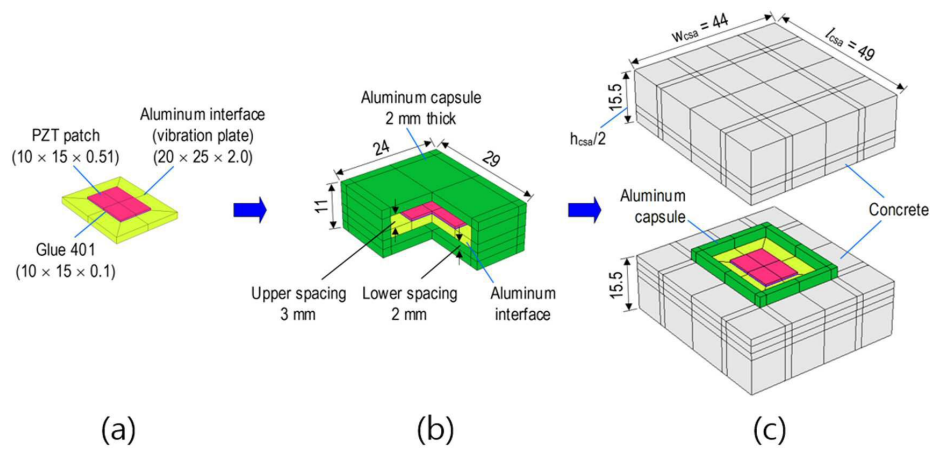
도면4



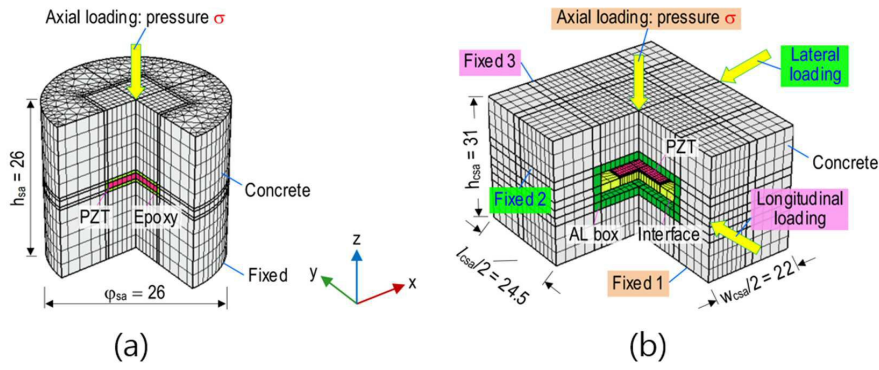
도면5



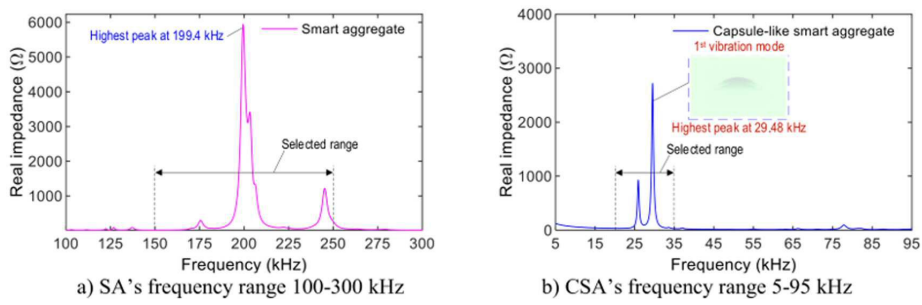
도면6



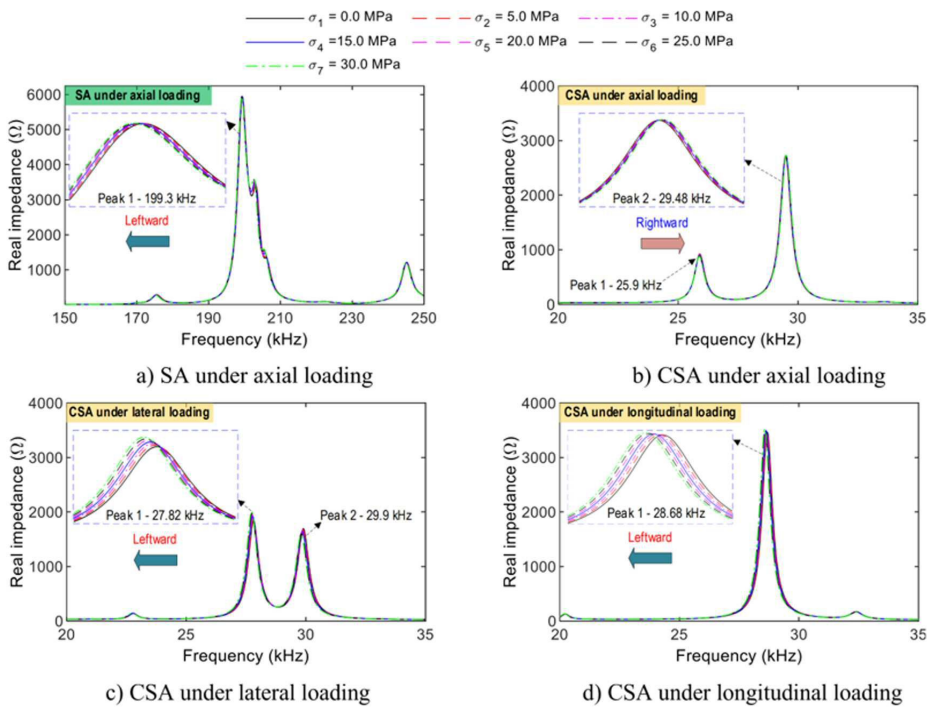
도면7



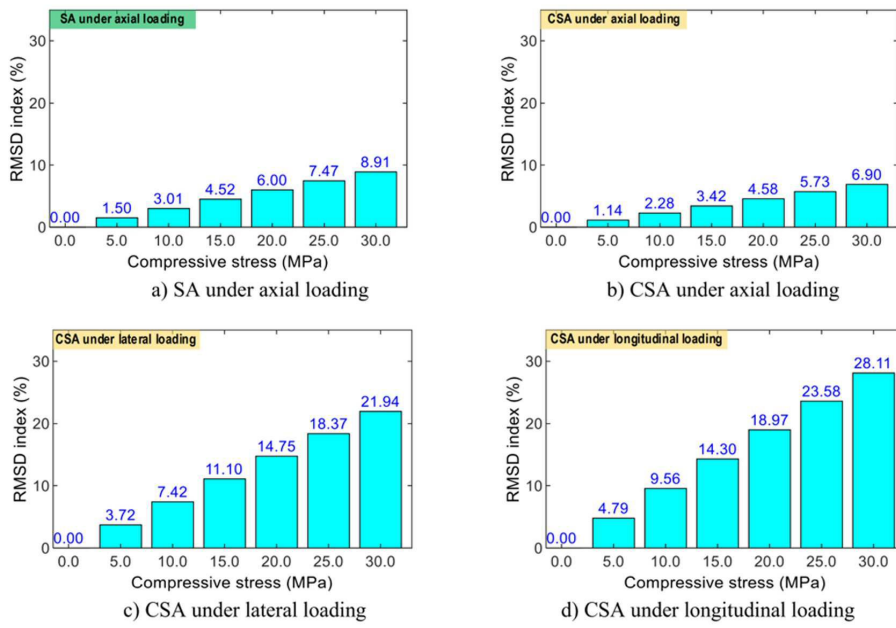
도면8



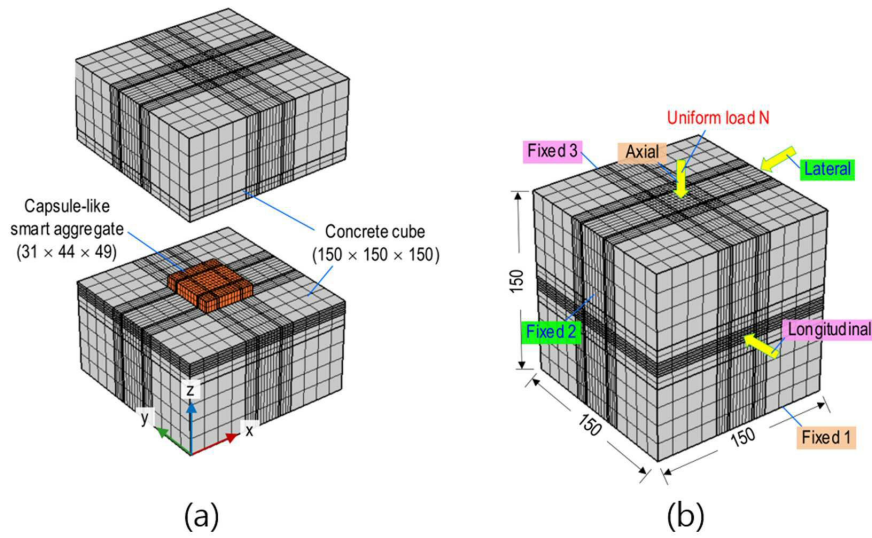
도면9



도면10

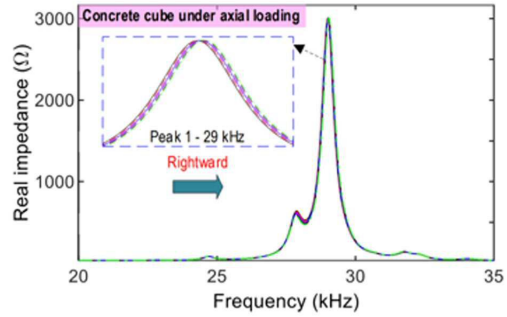


도면11

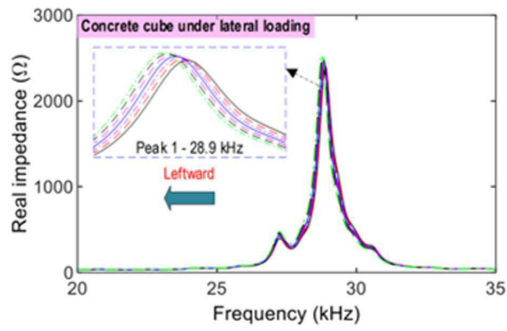


도면12

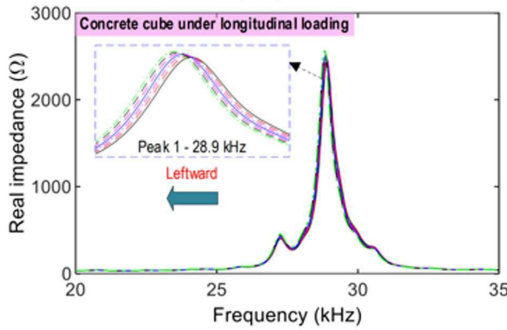
$\sigma_1 = 0.0$ MPa $\sigma_2 = 5.0$ MPa $\sigma_3 = 10.0$ MPa
 $\sigma_4 = 15.0$ MPa $\sigma_5 = 20.0$ MPa $\sigma_6 = 25.0$ MPa
 $\sigma_7 = 30.0$ MPa



(a)

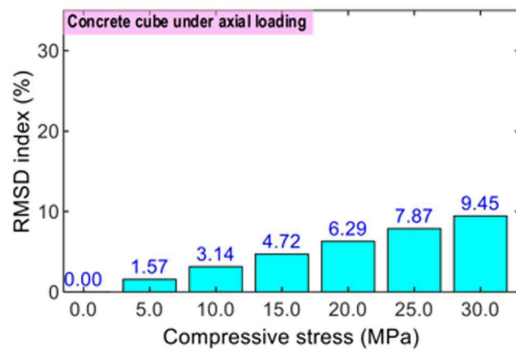


(b)

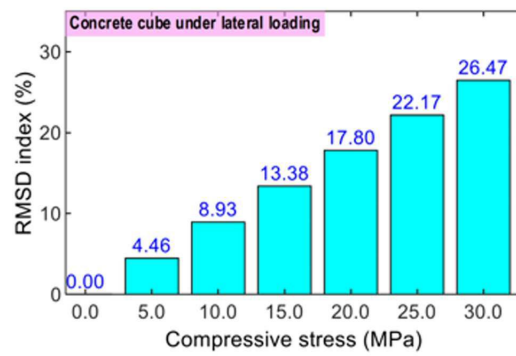


(c)

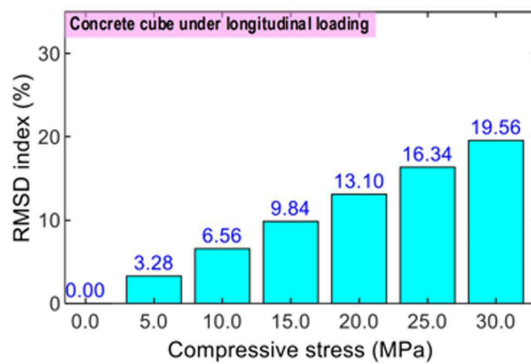
도면13



(a)



(b)



(c)