(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0073777
(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 10-2021-0160514
(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, 억로이
부산광역시 남구 용소로 45(대연동, 부경대학교대연캠퍼스)
팜, 쾅쾅
부산광역시 남구 용소로 45, 320호(대연동, 부경대학교대연캠퍼스 환경해양관)
(74) 대리인
김정수

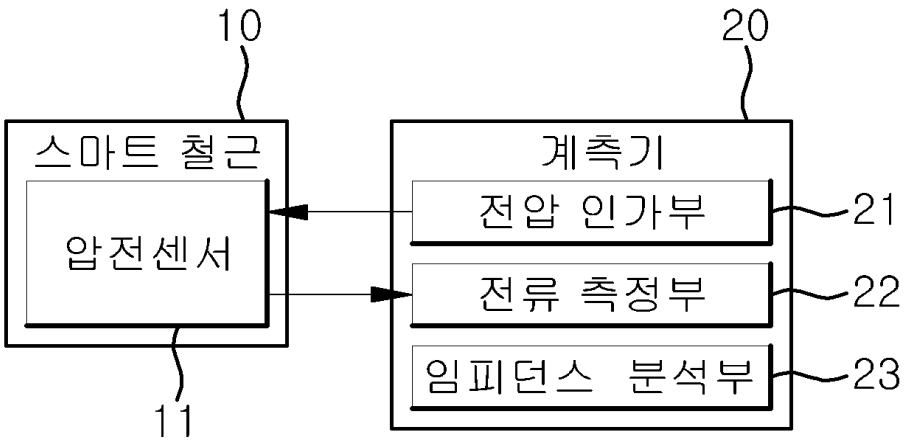
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 **압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치**

(57) 요 약

압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치가 개시된다. 콘크리트 모니터링 장치는, 철근의 측면 일부를 절삭하여 생성된 평면에 압전센서를 부착한 후 덮개로 덮음으로써, 철근에 압전센서가 임베딩(embedding)되어 생성된 스마트철근 및 압전센서를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 스마트철근의 진동에 따른 진동응답을 측정하는 계측기를 포함한다.

대 표 도 - 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

명 세 서

청구범위

청구항 1

압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치에 있어서,

철근의 측면 일부를 절삭하여 생성된 평면에 상기 압전센서를 부착한 후 덮개로 덮음으로써, 상기 철근에 상기 압전센서가 임베딩(embedding)되어 생성된 스마트철근; 및

상기 압전센서를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 상기 스마트철근의 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 수학식을 이용하여 상기 임피던스 응답을 측정하는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

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

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, ω는 가진 주파수이고, A_p는 상기 압전센서의 형상 파라메터이고, $\hat{\varepsilon}_{33}^{T}$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 스마트철근과 상기 콘크리트 구조물의 커플링(coupling) 역학적 임피던스임

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 커플링 역학적 임피던스는 2 자유도 임피던스 계측 모델을 이용하여 결정되되,

상기 2 자유도 임피던스 계측 모델은, 외부하중의 변화가 상기 압전센서의 인터페이스인 상기 스마트 철근 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 2 자유도 임피던스 계측 모델로부터, 상기 압전센서에 인가된 가진력 f_{ext} 하의 운동방정식은 하기 수학식으로 나타내어지는 것을 특징으로 하는 콘크리트 모니터링 장치.

$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} c_i & -c_i \\ -c_i & c_i+c_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i+k_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_i \\ x_s \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} f_{ext} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

여기서, $\ddot{x}_i, \dot{x}_i, x_i$ 는 질량 m_i에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이고, $\ddot{x}_s, \dot{x}_s, x_s$ 는 질량 m_s에 대응하는 가속도, 속도 및 변위임

청구항 6

제5항에 있어서,

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

$$Z_s(\omega)=\frac{(-\omega^2 m_i+i\omega c_i+k_i)(-\omega^2 m_s+i\omega(c_i+c_s)+(k_i+k_s))-(-i\omega c_i-k_i)^2}{i\omega(-\omega^2 m_s+i\omega(c_i+c_s)+(k_i+k_s))}$$

발명의 설명

기 술 분 야

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

배 경 기 술

[0002] 일반적으로, 콘크리트는 과대하중 및 응력집중으로 인하여 내부 균열이 발생한다. 발생된 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, 이 기술들의 압전센서 임베딩 스마트골재는 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, 이 기술들의 압전센서 임베딩 스마트골재는 현장의 작업 여건 상 콘크리트 구조물 내에서 계획된 계측 위치 및 방향으로 설치되지 않을 수 있는 불확실성이 크다. 즉, 콘크리트 내부 손상이 유발하는 국부응답을 민감하게 모니터링하기 위하여, 압전센서의 계측 위치 및 방향을 구조물 설계도면 상의 위치 및 방향으로 정확히 조정할 수 있는 기법이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

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

발명의 내용

해결하려는 과제

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

과제의 해결 수단

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

[0009] 본 발명의 실시예에 따른 콘크리트 모니터링 장치는, 철근의 측면 일부를 절삭하여 생성된 평면에 상기 압전센서를 부착한 후 덮개로 덮음으로써, 상기 철근에 상기 압전센서가 임베딩(embedding)되어 생성된 스마트철근 및 상기 압전센서를 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 상기 스마트철근의 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 수학식을 이용하여 상기 임피던스 응답을 측정한다.

[0012]
$$Z(\omega)=\frac{V(\omega)}{I(\omega)}=\left\{j\omega A_p\left[\hat{\varepsilon}_{33}^{T}-\frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega)+1}d_{31}^{2}\hat{Y}_{11}^{E}\right]\right\}^{-1}$$

[0013] 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, ω는 가진 주파수이고, A_p는 상기 압전센서의 형상 파라메터이고, $\hat{\varepsilon}_{33}^{T}$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 스마트철근과 상기 콘크리트 구조물의 커플링(coupling) 역학적 임피던스이다.

[0014] 상기 커플링 역학적 임피던스는 2 자유도 임피던스 계측 모델을 이용하여 결정되되, 상기 2 자유도 임피던스 계측 모델은, 외부하중의 변화가 상기 압전센서의 인터페이스인 상기 스마트 철근 및 상기 콘크리트 구조물의 구조강성(k_i, k_s) 및 감쇠계수(c_i, c_s)의 변화를 유발하는 것을 나타낸다.

[0015] 상기 2 자유도 임피던스 계측 모델로부터, 상기 압전센서에 인가된 가진력 f_{ext} 하의 운동방정식은 하기 수학식으로 나타내어진다.

[0016]
$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} c_i & -c_i \\ -c_i & c_i+c_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i+k_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_i \\ x_s \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} f_{ext} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

[0017] 여기서, $\ddot{x}_i, \dot{x}_i, x_i$는 질량 m_i에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이고, $\ddot{x}_s, \dot{x}_s, x_s$는 질량 m_s에 대응하는 가

속도, 속도 및 변위이다.

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

[0019] $$Z_s(\omega) = \frac{(-\omega^2 m_i + i\omega c_i + k_i)(-\omega^2 m_s + i\omega(c_i+c_s) + (k_i+k_s)) - (-i\omega c_i - k_i)^2}{i\omega(-\omega^2 m_s + i\omega(c_i+c_s) + (k_i+k_s))}$$

발명의 효과

[0020] 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치는, 압전센서가 임베딩(embedding)된 스마트철근을 이용하여 콘크리트 구조물 내에서 스마트철근의 진동에 따른 스마트철근의 진동응답을 측정함으로써, 콘크리트 구조물의 균열 발생 및 균열 진전을 장기적으로 감시할 수 있도록 압전센서의 신호감지 성능을 확보할 수 있고, 콘크리트 구조물 제작 시 설계도면 상의 위치 및 방향으로 압전센서의 계측 위치 및 방향을 설정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 구성을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면.

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

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

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

도 6 내지 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 성능검증을 위한 수치해석의 결과를 나타낸 도면.

도 10 내지 도 15는 본 발명의 실시예에 따른 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 성능검증을 위한 모형실험의 결과를 나타낸 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 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.

[0023] 이하, 본 발명의 다양한 실시예들을 첨부된 도면을 참조하여 상술하겠다.

[0024] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 구성을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면이고, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 스마트철근을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면이고, 도 3 및 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 스마트철근을 이용한 계측 개념을 개략적으로 예시하여 나타낸 도면이고, 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치가 측정한 임피던스 응답의 예를 나타낸 도면이다. 이하, 도 1을 중심으로, 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치에 대하여 설명하되, 도 2 내지 도 5를 참조하기로 한다.

[0025] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치는, 압전센서(11)가 임베딩(embedding)된 스마트철근(10) 및 압전센서(11)를 이용하여 콘크리트 내에서 스마트철근(10)의 진동에 따른 진동응답을 측정하는 계측기(20)를 포함하여 구성될 수 있다.

[0026] 스마트철근(10)은 철근의 측면 일부를 절삭하여 생성된 평면에 압전센서(11)를 부착한 후 덮개로 덮음으로써, 철근에 압전센서(11)가 임베딩되어 생성될 수 있다.

[0027] 예를 들어, 도 2를 참조하면, 스마트철근(10)은 지름 12㎜의 띠철근의 측면 일부를 절삭하여 압전센서 설치용

직사각형 평면(13)을 생성하고, 생성된 직사각형 평면(13)에 압전센서(11)를 접착한 후, 에폭시 덮개(epoxy cover)(15)로 덮음으로써, 철근에 압전센서(11)를 매립하여 생성될 수 있다. 여기서, 압전센서(11)는 철근의 응력 및 변형의 거동을 계측하는 장치로서, PZT(lead zirconate titanate) 패치(patch)일 수 있다.

[0028] 계측기(20)는 스마트철근(10)에 임베딩된 압전센서(11)를 이용하여 축하중을 받는 콘크리트 구조물 내에서 스마트철근(10)의 응력 및 변형의 거동 변화에 따른 임피던스 응답을 측정한다.

[0029] 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.

[0030] 다시, 도 1을 참조하면, 계측기(20)는 전압인가부(21), 전류측정부(22) 및 임피던스 분석부(23)를 포함할 수 있다.

[0031] 전압인가부(21)는 압전센서(11)에 미리 설정된 크기의 전압을 인가한다.

[0032] 전류측정부(22)는 전압인가부(21)에 의한 전압 인가에 따라 압전센서(11)로부터 출력되는 전류의 크기를 측정한다.

[0033] 임피던스 분석부(23)는 압전센서(11)에 인가된 전압의 크기 및 압전센서(11)로부터 출력되는 전류의 크기를 이용하여 임피던스 응답을 측정한다.

[0034] 예를 들어, 도 3은 콘크리트 구조물 내에 배치된 스마트철근(10)의 임피던스 응답의 계측 개념을 보여준다. 도 3을 참조하면, 외부 하중의 변화 N+ΔN은 콘크리트 구조물의 응력 및 변형의 거동 변화를 유발하고, 이는 스마트철근(10)의 응력 및 변형의 거동 변화를 일으킨다. 따라서, 스마트철근(10)의 응력 및 변형의 거동 변화를 임피던스 응답의 변화로 감지하여, 스마트철근(10)의 응력 및 변형의 거동 변화 및 이를 유발하는 외력의 변화가 추정될 수 있다.

[0035] 한편, 도 4는 2 자유도 임피던스 계측 모델의 예를 나타낸다. 도 4를 참조하면, 외부하중의 변화 ΔN은 PZT 인터페이스(스마트철근(10)) 및 콘크리트 구조물의 구조강성(k_i, k_s) 및 감쇠계수(c_i, c_s)의 변화를 유발한다.

[0036] 압전센서(11)에 전압 V(ω)가 인가되면, 역압전 효과로 가진력 F(ω)이 발생하며, 이 가진력이 스마트철근(10)에 작용하여 진동변형을 유발한다. 이와 동시에, 유발된 진동변형은 압전효과를 통해 전류 I(ω)로 출력되며, 하기 수학식과 같이, 입력 전압 V(ω)와 출력 전류 I(ω) 사이의 전기역학적 임피던스 신호 Z(ω)가 측정될 수 있다.

수학식 1

[0037]
$$Z(\omega)=\frac{V(\omega)}{I(\omega)}=\left\{j\omega A_p\left[\hat{\varepsilon}_{33}^{T}-\frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega)+1}d_{31}^{2}\hat{Y}_{11}^{E}\right]\right\}^{-1}$$

[0038] 여기서, ω는 가진 주파수이고, A_p는 압전센서(11)의 형상 파라메터이고, $\hat{\varepsilon}_{33}^{T}$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 스마트철근(10)과 콘크리트 구조물의 커플링(coupling) 역학적 임피던스이다. 이 커플링 역학적 임피던스는 도 4에 도시된 바와 같은 2 자유도 임피던스 모델에서 결정될 수 있다.

[0039] 도 4의 2 자유도 임피던스 계측 모델로부터, 압전센서(11)에 인가된 가진력 f_{ext} 하의 운동방정식은 하기 수학식으로 나타낼 수 있다.

수학식 2

[0040]
$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} c_i & -c_i \\ -c_i & c_i+c_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i+k_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_i \\ x_s \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} f_{ext} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

[0041] 여기서, $\ddot{x}_i, \dot{x}_i, x_i$ 는 질량 m_i에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이고, $\ddot{x}_s, \dot{x}_s, x_s$는 질량 m_s에 대응하는 가속도, 속도 및 변위이다.

[0042] 수학식 2로부터, 스마트철근(10)과 콘크리트 구조물의 커플링 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$는 하기 수학식으로 산출될 수 있다.

수학식 3

[0043]
$$Z_s(\omega)=\frac{(-\omega^2 m_i+i\omega c_i+k_i)(-\omega^2 m_s+i\omega(c_i+c_s)+(k_i+k_s))-(-i\omega c_i-k_i)^2}{i\omega(-\omega^2 m_s+i\omega(c_i+c_s)+(k_i+k_s))}$$

[0044] 콘크리트 구조물에 작용하는 하중 N이 N+ΔN으로 변화하면, 압전센서(11)가 매립된 스마트철근(10)에 작용하는 축하중 F는 F+ΔF로 변화한다. 이에 따라, 수학식 3과 같이, 콘크리트 구조물과 스마트철근(10)의 강성과 감쇠의 변화를 유발하여 커플링 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$의 변화를 발생시킨다. 따라서, 스마트철근(10)의 축하중 변화는 도 5에 도시된 바와 같이, 임피던스 응답의 주파수와 크기를 변화시키며, 수학식 1의 임피던스 신호 $Z(\omega)$의 변화로부터 산출될 수 있다.

[0045] 즉, 전술한 수학식 1 내지 수학식 3을 이용하여, 압전센서(11)가 매립된 스마트철근(10)의 임피던스 응답으로부터 콘크리트 구조물에 작용하는 하중의 변화 및 국부 응력의 변화가 추정될 수 있다.

[0046] 도 6 내지 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 성능검증을 위한 수치해석의 결과를 나타낸 도면이다.

[0047] 도 6에 도시된 바와 같은 제원을 가지는 공칭지름 13㎜의 이형철근이 선정되었으며, 압전센서(11)로서 PZT 패치가 적용되었다. PZT 패치의 설치 구조, 형상, 크기 등은 도 6에 도시된 바와 같다.

[0048] PZT 패치가 임베딩된 스마트철근(10)의 주파수 대역별 임피던스 응답특성 분석을 위하여, 도 7에 도시된 바와 같은 콘크리트 실린더 및 스마트철근의 유한요소모델을 생성하였다. 유한요소모델에 사용된 콘크리트, 이형철근 및 피복용 에폭시의 재료물성은 하기 표 1과 같고, PZT 패치의 재료물성은 하기 표 2와 같다.

표 1

[0049]

Material	Elastic Modulus (GPa)	Mass Density (kg/m3)	Poisson's ratio, υ	Damping loss factor, η
Concrete	23.6	2,400	0.2	
Rebar	200	7,850	0.3	0.02
Epoxy	0.74	1,090	0.35	

표 2

[0050]

Young Modulus Y^E_{11} (N/m^2)	Mass Density r (kg/m^3)	Coupling Constant d_{31} (m/V)	Dielectric Constant e^T_{33} (Farads/m)
6.1×10^{10}	7,650	-1.71×10^{-10}	1.53×10^{-8}

[0051] 6단계(N1~N6) 축방향 압축하중 시나리오로서, 축하중 N1=10kN(압축응력 1.3MPa), N2=30kN(3.9MPa), N3=50kN(6.5MPa), N4=70kN(9.1MPa), N5=90kN(11.7MPa), N6=110kN(14.3MPa)를 선정하였다.

[0052] 도 8은 6단계 압축하중 하의 콘크리트 실린더 내부의 스마트철근(10)으로부터 측정된 임피던스 응답 신호이다. 주파수 범위 100~600kHz에서 매 1kHz 당(전체 501점) 임피던스 응답이 측정되었다. 임피던스 응답의 공진주파수는 340kHz 근처에서 발생하였으며, 6단계 압축하중 하에서 주파수 범위 200~400kHz의 임피던스 응답 신호의 변화가 감지되었다.

[0053] 도 9와 같이, 임피던스 응답의 변화의 RMSD(root-mean-square-deviation) 분석을 수행하였다. 이 RMSD 분석의 결과로부터 6단계 압축하중과 임피던스 RMSD값 사이의 경험식이 추정되었다.

[0054] 도 10 내지 도 15는 본 발명의 실시예에 따른 압전센서 임베딩 스마트철근을 이용한 콘크리트 모니터링 장치의 성능검증을 위한 모형실험의 결과를 나타낸 도면이다.

[0055] 우선, 도 10에 도시된 바와 같이, PZT 패치가 임베딩된 스마트철근 프로토타입(prototype)을 제작하였다. 공칭직경 Φ10mm 이형철근에 직사각형 평면(12x6x1.5mm)을 절삭가공하고, PZT 패치(10x6x1mm)를 부착한 후, 에폭시로 방수 마감 처리하였다.

[0056] 도 10에서, (a)는 PZT 패치를 나타내고, (b)는 PZT 패치의 임베딩을 나타내고, (c)는 피복된 스마트철근을 나타낸다.

[0057] 도 11의 (a)는 도 10에 도시된 스마트철근 프로토타입이 내부에 설치된 직경 100mm 및 높이 200mm의 콘크리트 실린더이다. 그리고, 도 11의 (b)는 콘크리트 실린더에 압축하중을 재하하고 임피던스 신호를 계측하는 실험 장면이다. 여기서, 콘크리트 실린더의 28일 압축강도는 23.3MPa로 측정되었다. 그리고, 콘크리트, 이형철근 및 피복용 에폭시의 재료물성은 전술한 표 1과 같고, PZT 패치의 재료물성은 전술한 표 2와 같다.

[0058] 6단계(N1~N6) 축방향 압축하중 시나리오로서, 축하중N1=10kN(압축응력 1.3MPa), N2=30kN(3.9MPa), N3=50kN(6.5MPa), N4=70kN(9.1MPa), N5=90kN(11.7MPa), N6=110kN(14.3MPa)를 선정하였다.

[0059] 도 12는 6단계 압축하중 하의 콘크리트 실린더 내부의 스마트철근으로부터 측정된 임피던스 응답 신호을 나타낸다. 주파수 범위 100~600kHz에서 매 1kHz 당(전체 501점) 임피던스 응답이 측정되었다. 임피던스 응답의 공진주파수는 300kHz 근처에서 발생하였으며, 6단계 압축하중 하에서 주파수 범위 200~400 kHz의 임피던스 응답 신호의 변화가 감지되었다.

[0060] 도 13과 같이, 임피던스 응답의 변화를 RMSD(root-mean-square-deviation) 분석하였다. 6단계 압축하중 시나리오의 각 경우마다 4회 측정된 임피던스 신호의 평균 및 표준편차를 산정하였다. 축하중 N1 경우를 비손상 구조상태로 간주하여 임피던스의 평균과 표준편차로부터 RMSD의 신뢰한계(CL, Control Limit)를 0.5%로 산출하였다. 축하중 N2~N6 경우에서 측정된 임피던스의 RMSD가 신뢰한계 CL=0.5%를 초과하므로, N2~N6 경우가 손상상태로 판정되었다.

[0061] 도 14는 6단계 압축하중 하의 콘크리트 실린더의 임피던스 RMSD값 사이의 추정된 경험식을 나타낸 그래프이다. 도 14의 (a)는 임피던스 RMSD값과 압축응력 사이의 선형 추정식을 나타내며, 도 14의 (b)는 임피던스 RMSD값과 압축응력 사이의 비선형 추정식을 나타낸다.

[0062] 스마트철근 임피던스 RMSD 경험식을 통한 압축응력 추정결과는 하기 표 3과 같다.

표 3

[0063]

Case	Prestress Scenario		Impedance RMSD(%)	Stress Estimation		
	Force (kN)	Stress (MPa)		FEM	Exp - 1st Order	Exp - 2nd Order
PS1	10	1.27	0.15	1.47	2.87	-
PS2	30	3.82	0.60	2.54	4.12	5.70
PS3	50	6.37	1.05	3.61	5.38	7.34
PS4	70	8.92	1.53	4.76	6.72	8.59
PS5	90	11.46	2.58	7.25	9.65	10.66
PS6	110	14.01	5.26	13.63	17.12	14.37

[0064] 도 15는 콘크리트 실린더에 입력된 6단계 압축응력과 임피던스 경험식을 통해 추정된 압축응력을 비교한 결과를 나타낸다. 즉, 도 15의 (a)는 유한요소해석(FEM) 기반의 선형 추정식의 결과이며, 임피던스 RMSD값을 통한 추정결과의 정확도가 낮다. 그리고, 도 15의 (b)는 모형실험 기반 선형 추정식의 결과이며, 추정결과는 80% 이하의 정확도를 보인다. 그리고, 도 13의 (c)는 모형실험 기반 비선형 추정식의 결과이며, 추정결과는 90% 정도의 높은 정확도를 보인다. 따라서, 스마트철근의 임피던스 응답을 이용한 콘크리트 응력 추정식은 모형실험 기반의 2차원 포물선 추정식이 채택되었다.

[0065] 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.

[0066] 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.

[0067] 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

[0068] 10: 스마트철근

11: 압전센서

20: 계측기

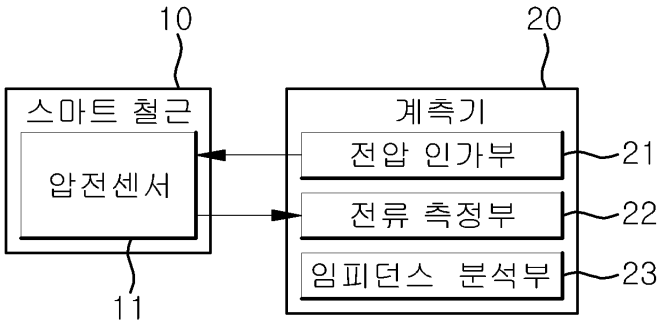
21: 전압인가부

22: 전류측정부

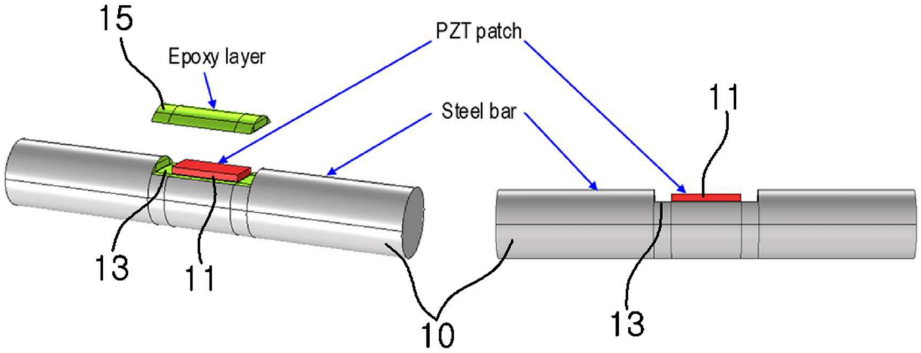
23: 임피던스 분석부

도면

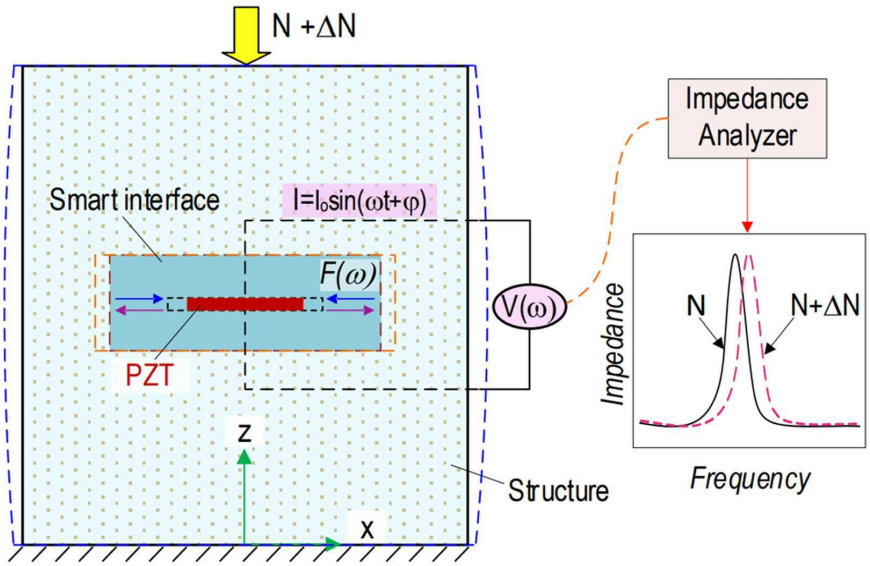
도면1



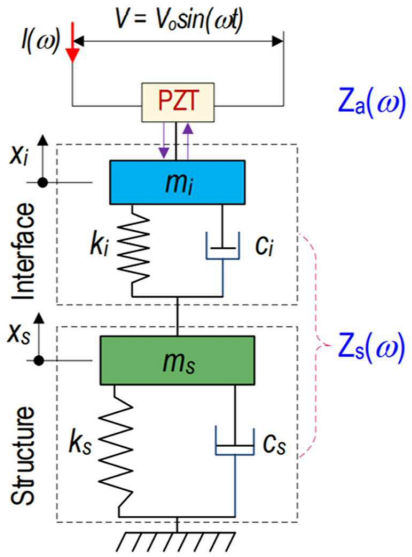
도면2



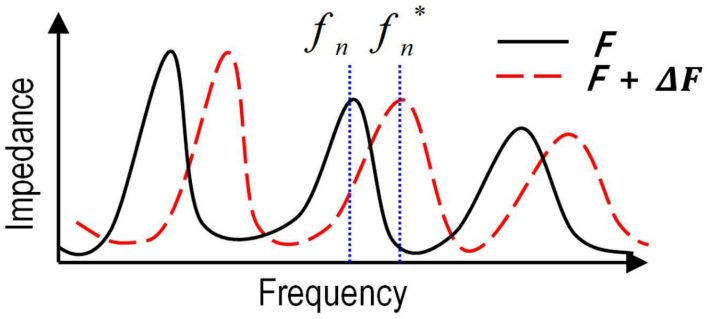
도면3



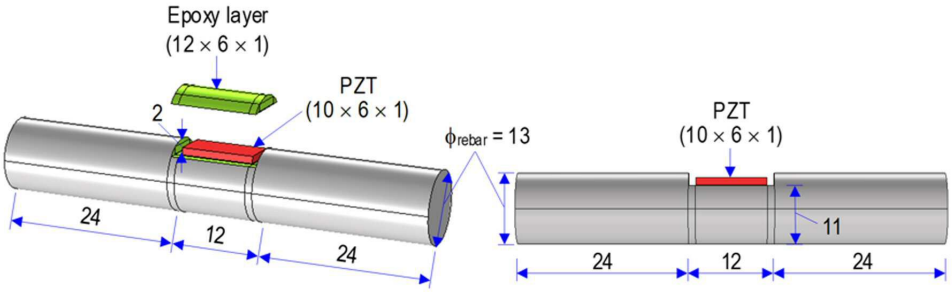
도면4


I(ω)
V = Vosin(ωt)
PZT
Za(ω)
xi
mi
ki
ci
Interface
xs
ms
ks
cs
Structure
Zs(ω)

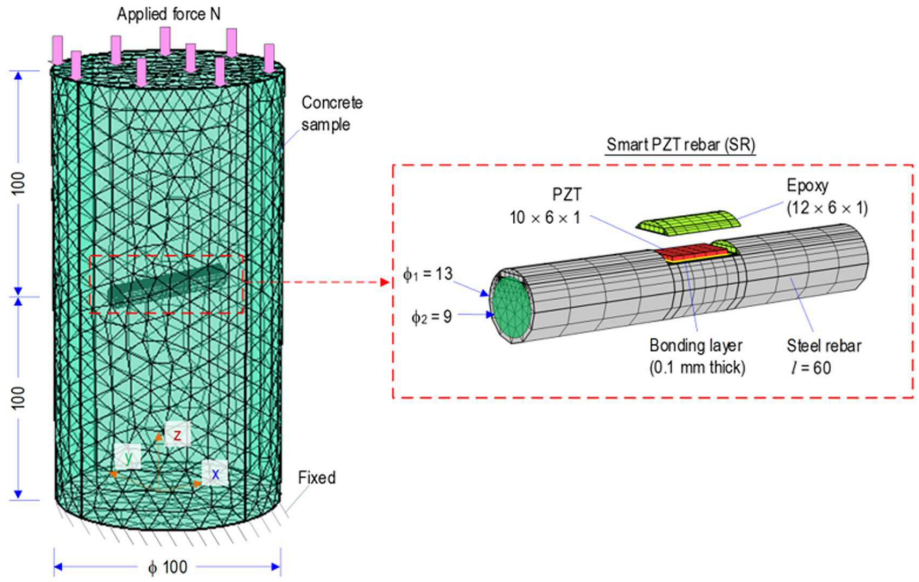
도면5


Impedance
Frequency
fn
fn*
F
F + ΔF

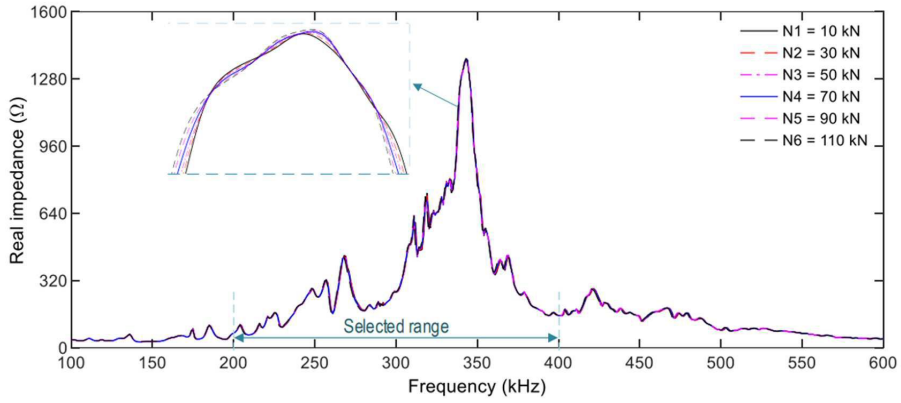
도면6


Epoxy layer
(12 × 6 × 1)
PZT
(10 × 6 × 1)
2
ϕrebar = 13
PZT
(10 × 6 × 1)
11
24
12
24
24
12
24

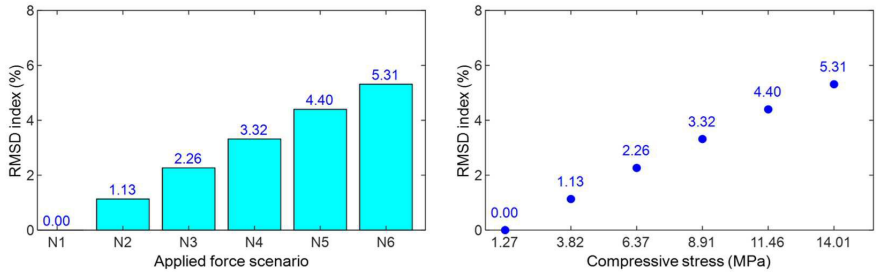
도면7


Applied force N
Concrete sample
100
100
Fixed
ϕ 100
Smart PZT rebar (SR)
PZT
10 × 6 × 1
Epoxy
(12 × 6 × 1)
ϕ1 = 13
ϕ2 = 9
Bonding layer
(0.1 mm thick)
Steel rebar
l = 60

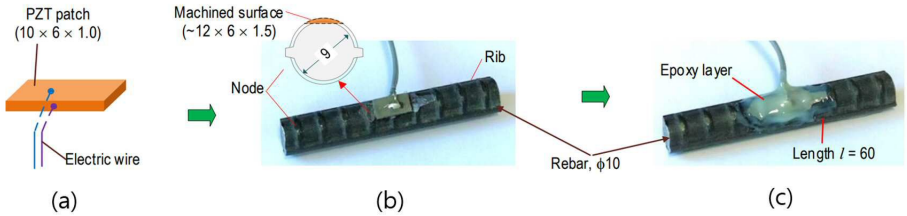
도면8


Real impedance (Ω)
Frequency (kHz)
Selected range
N1 = 10 kN
N2 = 30 kN
N3 = 50 kN
N4 = 70 kN
N5 = 90 kN
N6 = 110 kN

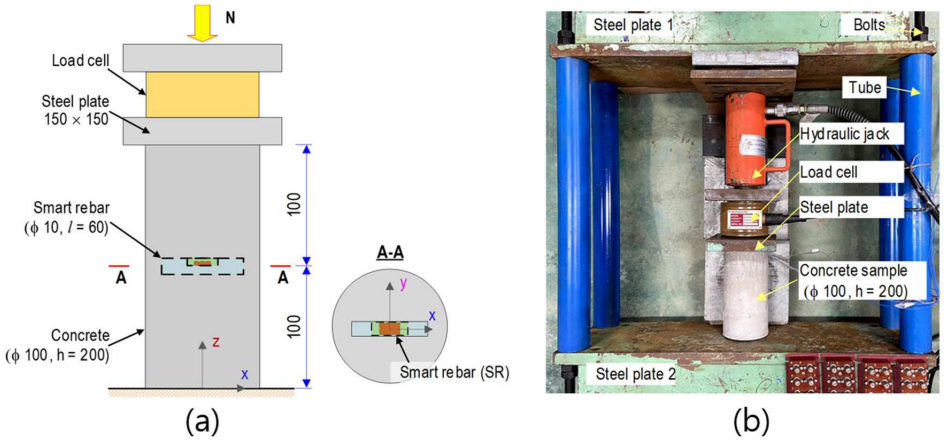
도면9


RMSD index (%)
Applied force scenario
N1
N2
N3
N4
N5
N6
0.00
1.13
2.26
3.32
4.40
5.31
Compressive stress (MPa)
1.27
3.82
6.37
8.91
11.46
14.01

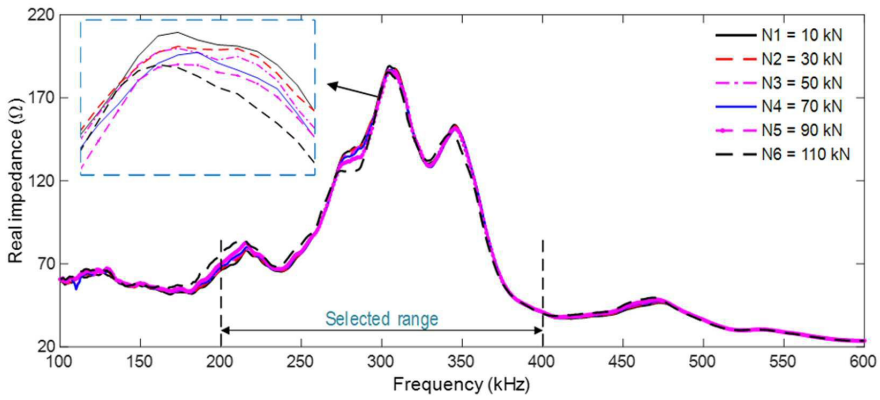
도면10



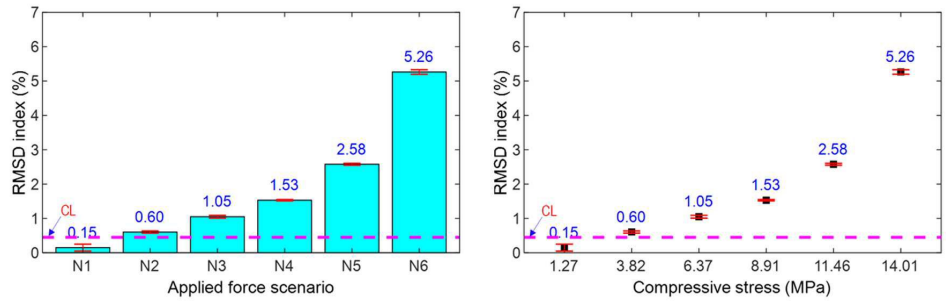
도면11



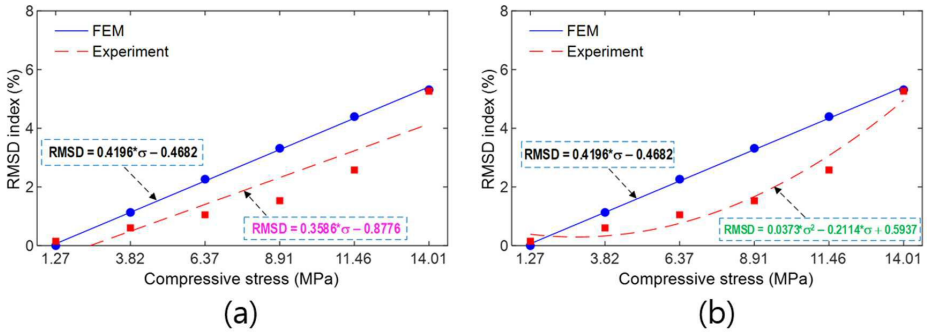
도면12



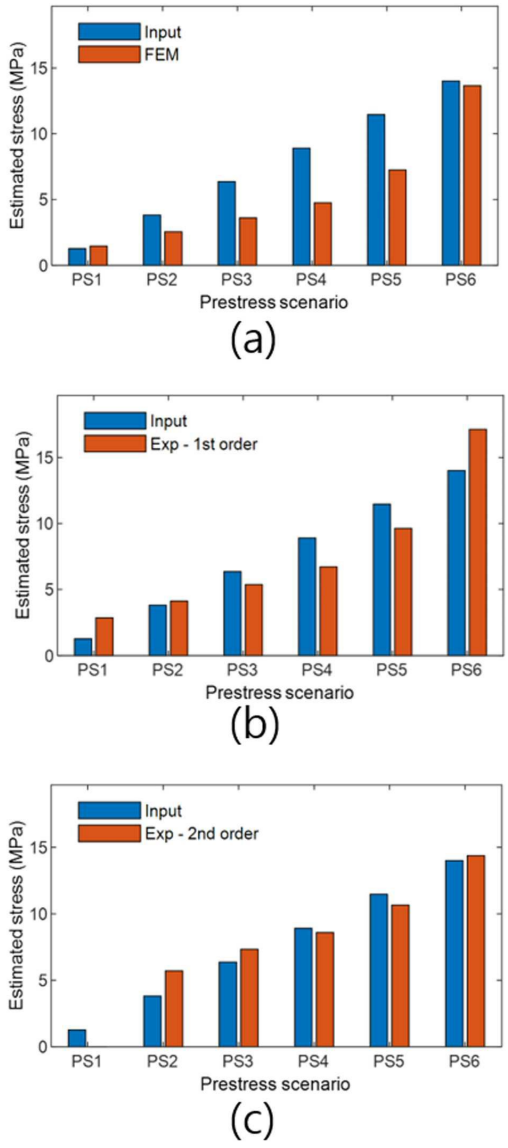
도면13



도면14


FEM
Experiment
RMSD index (%)
RMSD = 0.4196*σ – 0.4682
RMSD = 0.3586*σ – 0.8776
Compressive stress (MPa)
(a)
FEM
Experiment
RMSD index (%)
RMSD = 0.4196*σ – 0.4682
RMSD = 0.0373*σ² – 0.2114*σ + 0.5937
Compressive stress (MPa)
(b)

도면15


Input
FEM
Estimated stress (MPa)
PS1 PS2 PS3 PS4 PS5 PS6
Prestress scenario
(a)
Input
Exp - 1st order
Estimated stress (MPa)
PS1 PS2 PS3 PS4 PS5 PS6
Prestress scenario
(b)
Input
Exp - 2nd order
Estimated stress (MPa)
PS1 PS2 PS3 PS4 PS5 PS6
Prestress scenario
(c)