(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0125212
(43) 공개일자 2018년11월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 27/20 (2006.01) *G01N 33/38* (2006.01)
G06F 17/18 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 27/20 (2013.01)
G01N 33/383 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0059749
(22) 출원일자 2017년05월15일
심사청구일자 2017년05월15일

(71) 출원인
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
안윤규
서울특별시 동대문구 장안벚꽃로 167, 217동 1302호 (장안동, 래미안장안2차아파트)
강만성
서울특별시 중랑구 사가정로45길 3-8 (면목동)
(74) 대리인
특허법인엠에이피에스

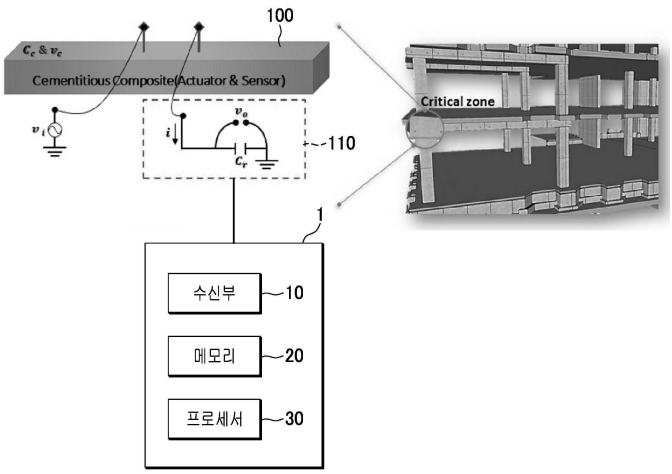
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 **자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치 및 방법**

(57) 요 약

자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치는 구조물에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 수신부, 구조물 모니터링 프로그램이 저장된 메모리, 구조물 모니터링 프로그램을 실행하는 프로세서를 포함하되, 프로세서는 구조물 모니터링 프로그램의 실행에 따라, 수집된 다수의 전기 임피던스 신호에 기초하여 구조물의 손상 진단 여부를 판단하되, 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 구조물의 손상 진단을 수행한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G06F 17/18 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 16CTAP-C114934-01
부처명 국토교통부
연구관리전문기관 국토교통과학기술진흥원
연구사업명 국토교통기술촉진연구사업
연구과제명 SOC 시설물 재해 재난 방지를 위한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템
기 여 율 1/1
주관기관 세종대학교 산학협력단
연구기간 2016.06.22 ~ 2017.06.21

명 세 서

청구범위

청구항 1

자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치에 있어서,

상기 구조물에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 수신부,

구조물 모니터링 프로그램이 저장된 메모리,

상기 구조물 모니터링 프로그램을 실행하는 프로세서를 포함하되,

상기 프로세서는 상기 구조물 모니터링 프로그램의 실행에 따라, 수집된 다수의 전기 임피던스 신호에 기초하여 구조물의 손상 진단 여부를 판단하되, 상기 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 상기 구조물의 손상 진단을 수행하는 것인 모니터링 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 프로세서는 상기 주성분 데이터를 기초로 학습 데이터를 생성하고, 새롭게 입력된 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용한 후 학습 데이터와의 비교결과에 기초하여 상기 구조물의 손상 진단을 수행하는 것인 모니터링 장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 프로세서는 상기 전기 임피던스 신호에 대하여 낮은 차원의 데이터를 고차원으로 변환시키는 비선형 변환 함수를 적용하고, 변환된 고차원 데이터를 이용해 공분산 행렬을 생성하고, 상기 공분산 행렬에 기초하여 고유값 문제를 구성하고, 고유값 문제에 소정의 커널함수를 적용하여 고유값, 고유벡터 및 비선형 주성분을 획득하는 것인 모니터링 장치.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 프로세서는 입력된 상기 주성분 데이터에 기초하여 극값분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따르는 통계적 모델을 생성하고, 상기 통계적 모델에 기초하여 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교 결과에 기초하여 손상 여부를 진단하는 모니터링 장치.

청구항 5

자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 방법에 있어서,

상기 구조물에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 단계;

상기 수신된 전기 임피던스 신호를 수집하여 학습 데이터를 생성하되, 상기 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 학습 데이터를 생성하는 단계; 및

새롭게 입력된 전기 임피던스 신호에 상기 비선형 주성분 분석 방법을 적용한 후 상기 학습 데이터와의 비교결과에 기초하여 상기 구조물의 손상 진단을 수행하는 단계를 포함하는 구조물의 모니터링 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 학습 데이터를 생성하는 단계는

상기 전기 임피던스 신호에 대하여 낮은 차원의 데이터를 고차원으로 변환시키는 비선형 변환함수를 적용하는 단계;

변환된 고차원 데이터를 이용해 공분산 행렬을 생성하는 단계;

상기 공분산 행렬에 기초하여 고유값 문제를 구성하는 단계; 및

상기 고유값 문제에 소정의 커널함수를 적용하여 고유값, 고유벡터 및 비선형 주성분을 획득하는 단계를 포함하는 것인 구조물 모니터링 장치.

청구항 7

제 5 항에 있어서,

상기 구조물의 손상 진단을 수행하는 단계는

상기 주성분 데이터에 기초하여 극값분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따르는 통계적 모델을 생성하는 단계; 및

상기 통계적 모델에 기초하여 상기 새롭게 입력된 전기 임피던스 신호와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교 결과에 기초하여 손상 여부를 진단하는 단계를 포함하는 구조물 모니터링 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 콘크리트 구조물의 손상진단 평가 기술은 큰 분류로 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있다. 콘크리트 구조물의 접촉식 손상진단 평가기술에는 대표적으로 초음파 기법이 있다. 초음파 기법은 초음파 센서를 콘크리트 구조물에 부착해 전기역학적 신호를 계측함으로써 상태를 평가하는 방식이다. 접촉식 센서는 높은 민감도를 자랑하며, 센서 비용이 저렴한 장점이 있는 반면, 센서 자체의 내구성의 문제 및 환경변화에 따른 취득신호의 분석이 어렵다는 문제점이 있다.

[0003] 비접촉식 손상진단 평가로는 자외선 검사법, 전자기파를 이용한 손상진단 평가 등이 있으나, 데이터 취득이 간편한 장점이 있는 반면 콘크리트 구조물에 적용하기에는 민감도가 낮으며, SHM(Structural Health Monitoring) 목적으로 사용이 어렵다.

[0004] 이와 같은 방법 외에 자가 센싱 콘크리트를 활용한 전기저항 측정법이 콘크리트 손상 진단에 널리 연구되어 오고 있다. 콘크리트에 전도성을 지닌 섬유 등을 첨가함으로써 자가 센싱이 가능토록 하는 방법이다.

[0005] 따라서 별도의 센서를 사용하지 않고 구조물 자체의 응답계측이 가능해진다. 대표적으로 직류전기 신호측정과 교류전기 신호측정이 있으며, 직류전기 신호측정은 구조물에 전하가 쌓여 저항 값이 안정화 되는데 상당한 시간이 소요된다. 이는 실시간 SHM의 목적에 부합하지 않으며, 상대적으로 안정화 시간이 필요 없는 교류전기 측정이 SHM 목적에 부합된다.

[0006] 이와 관련하여, 대한민국 등록특허 제 10-1551446호(발명의 명칭: 도전성 섬유를 혼입한 시멘트 복합체의 원격 모니터링 시스템 및 그 방법)에서는, 시멘트 복합체의 강성을 증가시키는 보강섬유로서 도전성 섬유(또는 전기전도성 섬유)를 시멘트 복합체 내에 혼입하고, 하중, 화재 또는 지진의 외부 환경적 요인에 따른 시멘트 복합체의 응력 변화를 도전성 섬유로부터 검출하여 원격 모니터링할 수 있는 시멘트 복합체의 원격 모니터링 시스템 및 방법을 개시하고 있다.

[0007] 그러나, 다양한 연구에서 자가센싱 콘크리트 재료를 개발하여 왔으나, 이를 실제 SHM의 목적으로 활용하기 위해서는 실시간 계측 시스템의 개발, 환경영향에 따른 오보 최소화, 추가적으로 본 재료를 구조 부재로써 활용할 수 있도록 추가 연구가 필요한 상황이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 일 실시예는 전술한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, SHM 목적을 구현하기 위하여 실시간으로 계측된 전기 임피던스 신호를 머신 러닝(Machine Learning) 기반의 손상진단 알고리즘을 통해 처리함으로써, 주변 환경영향성을 배제한 손상 정보만을 제공하고자 한다.

[0009] 다만, 본 실시예가 이루고자 하는 기술적 과제는 상기된 바와 같은 기술적 과제로 한정되지 않으며, 또 다른 기술적 과제들이 존재할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 상술한 기술적 과제를 달성하기 위한 기술적 수단으로서, 본 발명의 일 측면에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치는 구조물에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 수신부, 구조물 모니터링 프로그램이 저장된 메모리, 구조물 모니터링 프로그램을 실행하는 프로세서를 포함하되, 프로세서는 구조물 모니터링 프로그램의 실행에 따라, 수집된 다수의 전기 임피던스 신호에 기초하여 구조물의 손상 진단 여부를 판단하되, 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 구조물의 손상 진단을 수행한다.

[0011] 그리고, 본 발명의 다른 측면에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 방법은 구조물에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 단계; 수신된 전기 임피던스 신호를 수집하여 학습 데이터를 생성하되, 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 학습 데이터를 생성하는 단계; 및 새롭게 입력된 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용한 후 학습 데이터와의 비교결과에 기초하여 구조물의 손상 진단을 수행하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0012] 전술한 본 발명의 과제 해결 수단 중 어느 하나에 의하면, 머신 러닝 기반의 손상진단 알고리즘을 통하여, 최종적으로 주변 환경영향을 배제한 손상 정보만을 실시간으로 사용자에게 전달할 수 있다. 즉, 용이치 않았던 콘크리트 구조물의 SHM을 궁극적으로 구현할 수 있으며, 특히 자가센싱 콘크리트가 구조부재로 직접적으로 활용되는 장점을 갖는다.

[0013] 또한 추가적인 센서의 매립이나 부착이 요구되지 않으므로 이와 관련한 유지관리가 필요하지 않은 장점을 지닌다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치의 구성도이다.

도 2a 내지 도 2c는 본 발명의 일 실시예에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 여부를 모니터링하는 방법을 설명하기위한 순서도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 주성분 분석 방법의 개념을 설명하기 위한 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 온도 및 습도에 따른 전기 임피던스의 변화를 분석하기 위한 저항 값 및 리액턴스 값을 나타낸 그래프이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 휨 실험에 대한 힘-변위 곡선(Force-Displacement curve)을 나타낸 그래프이다.

도 6은 도 5의 구조물 손상 별 전기 임피던스의 변화를 분석하기 위한 저항 값 및 리액턴스 값을 나타낸 그래프이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 주성분 데이터에 기초하여 생성된 통계적 모델에 기초하여 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차를 나타낸 도면이다.

도 8은 도 7의 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교결과를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 아래에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예를 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 본 발명을 명확하게 설명하기 위해 도면에서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다. 또한, 도면을 참고하여 설명하면서, 같은 명칭으로 나타낸 구성일지라도 도면에 따라 도면 번호가 달라질 수 있고, 도면 번호는 설명의 편의를 위해 기재된 것에 불과하고 해당 도면 번호에 의해 각 구성의 개념, 특징, 기능 또는 효과가 제한 해석되는 것은 아니다.

[0016] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 다른 부분과 "연결"되어 있다고 할 때, 이는 "직접적으로 연결"되어 있는 경우뿐 아니라, 그 중간에 다른 소자를 사이에 두고 "전기적으로 연결"되어 있는 경우도 포함한다. 또한, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미하며, 하나 또는 그 이상의 다른 특징이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0017] 본 명세서에 있어서 '부(部)' 또는 '모듈'이란, 하드웨어 또는 소프트웨어에 의해 실현되는 유닛(unit), 양방을 이용하여 실현되는 유닛을 포함하며, 하나의 유닛이 둘 이상의 하드웨어를 이용하여 실현되어도 되고, 둘 이상의 유닛이 하나의 하드웨어에 의해 실현되어도 된다.

[0018] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치의 구성도이다.

[0019] 도 1을 참조하면, 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치(1)는 구조물(100)에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 수신부(10), 구조물 모니터링 프로그램이 저장된 메모리(20), 구조물 모니터링 프로그램을 실행하는 프로세서(30)를 포함한다. 프로세서(30)는 구조물 모니터링 프로그램의 실행에 따라, 수집된 다수의 전기 임피던스 신호에 기초하여 구조물(100)의 손상 진단 여부를 판단하되, 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 구조물(100)의 손상 진단을 수행할 수 있다.

[0020] 따라서, 본 발명의 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치는 센서의 매립 혹은 부착 없이 실시간으로 전기 임피던스를 계측 및 분석할 수 있다. 또한, 사용자에게 실시간으로 온도 및 습도에 따른 외부환경변화와 관계없이 균열 발생 여부에 따른 손상 정보만을 전달하기 때문에 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치의 오보를 최소한다는 효과가 있다.

[0021] 먼저, 전기 임피던스를 계측하는 방법에 대하여 설명하도록 한다.

[0022] 구체적으로, 수신부(10)는 자가 센싱 회로(110)를 통해 구조물(100)에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신할 수 있다. 여기서, 구조물(100)은 신호계측 센서로서 활용이 가능한 자가센싱 콘크리트를 의미한다. 일 예로, 콘크리트 혼합물의 조합은 무게기준으로 시멘트 양의 비례하는 만큼 혼합되고, 콘크리트는 전도성과 강성을 높여 줄 강 섬유를 혼합하여 양생될 수 있다. 즉, 콘크리트의 단면에 구비되는 철들이 강 섬유로서 전기가 흐르는 통로가 되며, 콘크리트의 전도성을 높일뿐 아니라 강성을 높여주는 역할을 한다.

[0023] 또한, 콘크리트의 전기 임피던스를 측정하기 위해서는 비전도성인 콘크리트의 전도성을 부여해야 한다. 도1에 도시된 바와 같이, 구조물(100)은 섬유보강 시멘트 복합재료가 보강되어있는 강섬유(예를 들어, 스틸(Steel) 혹은 구리(copper))가 돌출되게 설계될 수 있으며, 돌출된 전극을 통해서 전기 임피던스를 계측할 수 있다. 계측에 사용되는 입력(Input) 신호는 주파수 스위핑(Frequency sweeping)을 활용한다. 이어서, 출력(Input) 신호를 통해서 전기 임피던스 신호를 계측함으로써 다양한 주파수에서 많은 특성과 특징 변화를 확인할 수 있다.

[0024] 예시적으로 먼저, 자가 센싱 회로(110, Self-sensing circuit)를 통해서 섬유보강 시멘트 복합재료의 정전용량 값을 측정하고 전기 응답(Electrical response)를 계산하는데 사용되는 자가 센싱 스킴(Self-sensing scheme)을 계산한다. 계산 과정은 아래의 수학식 1과 같다.

[0025] <수학식1>

$$i(\tau) = C_c\left[\dot{v}_i(\tau) + \dot{v}_c(\tau) - \dot{v}_o(\tau)\right] = C_r\dot{v}_o(\tau)$$

$$C_c\int_0^t (\dot{v}_i(\tau) + \dot{v}_c(\tau) - \dot{v}_o(\tau))d\tau = C_r\int_0^t \dot{v}_o(\tau)d\tau$$

$$v_o(t) = \frac{C_c}{C_c + C_r}(v_i(t) + v_c(t)) \simeq \frac{C_c}{C_c + C_r}v_i(t)$$

$$SF = \frac{\sum_0^{m-1} \tilde{v}_o[k] \bullet \sin(wk\Delta t)}{\sum_0^{m-1} \tilde{v}_i[k] \bullet \sin(wk\Delta t)}$$

[0026]

[0027] C_c, v_c, v_i, v_o, i, C_r은 각각 섬유보강 시멘트 복합재료의 정전용량, 전압, 입력 전압, 출력 전압, 출력 전류, 레퍼런스(Reference)의 정전용량을 나타내고, τ는 단기주기를(short time term) 의미한다. 전압의 미분 값과 교류전압, 각속도를 나타낸다.

[0028] 이어서, 수학식1을 통해 구한 자가 센싱 스킴을 통해서 입력 파형(Input Waveform)을 사용해 전기 임피던스를 계측한다. 계측 과정은 아래의 수학식 2와 같다.

[0029] <수학식2>

$$v_o[k] = SF \bullet (v_i[k] + v_c[k])$$

$$\Rightarrow v_c[k] = \frac{1}{SF}v_o[k] - v_i[k]$$

[0030]

[0031] 프로세서(30)는 주성분 데이터를 기초로 학습 데이터를 생성하고, 새롭게 입력된 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용한 후 학습 데이터와의 비교결과에 기초하여 구조물(100)의 손상 진단을 수행할 수 있다.

[0032] 프로세서(30)는 전기 임피던스 신호에 대하여 낮은 차원의 데이터를 고차원으로 변환시키는 비선형 변환함수를 적용하고, 변환된 고차원 데이터를 이용해 공분산 행렬을 생성하고, 공분산 행렬에 기초하여 고유값 문제를 구성하고, 고유값 문제에 소정의 커널함수를 적용하여 고유값, 고유벡터 및 비선형 주성분을 획득할 수 있다.

[0033] 프로세서(30)는 입력된 주성분 데이터에 기초하여 극값분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따르는 통계적 모델을 생성하고, 통계적 모델에 기초하여 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교 결과에 기초하여 손상 여부를 진단할 수 있다.

[0034] 구체적으로, 섬유보강 시멘트 구조물(100)에 손상이 없을 때 측정된 데이터들로부터의 특성을 추출하고, 이들에 대해 GEV 분포를 따르는 통계적 모델을 생성한다. 이어서, 추정된 확률모델의 누적밀도함수(Cumulative Density Function, CDF)를 계산한 후, 계산된 CDF를 이용해 신뢰구간을 설정한다. 이때, 해당 신뢰도를 가지는 값이 임계값으로 설정된다.

[0035] 또한, 프로세서(30)는 입력 데이터(test data)의 손상 지수(damage index)가 임계값을 초과하면 손상이 발생한 것으로 인지할 수 있다. 이때, 손상 지수는 주성분 분석 방법을 통해서 획득한 주성분 데이터를 고차원으로 변형시킨 후 정사영시킨 입력 데이터와 훈련 데이터(training data)간의 거리차를 의미한다. 이에 대한 상세한 설명은 수학식 12 내지 14, 도 7 및 도 8을 참조하여 후술하기로 한다.

[0036] 일 예로, 프로세서(30)는 구조물(100)에서 전송된 다수의 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 생성하고, 이를 기초로 학습 데이터를 생성할 수 있다. 따라서, 구조물(100)에 손상이 발생할 경우 프로세서(30)는 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차를 산출하고, 거리차와 임계값을 비교하여 초과할 경우 구조물(100)에 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

[0037] 이하에서는 본 발명의 다른 실시예에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 여부를 모니터

링하는 방법을 설명하고자 한다.

[0038] 상술한 도 1에 도시된 구성 중 동일한 기능을 수행하는 구성의 경우 설명을 생략하기로 한다.

[0039] 도 2a 내지 도 2c는 본 발명의 일 실시예에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 여부를 모니터링하는 방법을 설명하기위한 순서도이다.

[0040] 도 2a를 참조하면, 본 발명의 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 여부를 모니터링하는 방법은 구조물(100)에서 전송된 전기 임피던스 신호를 수신하는 단계(S110), 수신된 전기 임피던스 신호를 수집하여 학습 데이터를 생성하되, 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화한 주성분 데이터를 기초로 학습 데이터를 생성하는 단계(S120) 및 새롭게 입력된 전기 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용한 후 학습 데이터와의 비교결과에 기초하여 구조물의 손상 진단을 수행하는 단계(S130)를 포함한다.

[0041] 도 2b를 참조하면, 학습 데이터를 생성하는 단계(S120)는 전기 임피던스 신호에 대하여 낮은 차원의 데이터를 고차원으로 변환시키는 비선형 변환함수를 적용하는 단계(S121), 변환된 고차원 데이터를 이용해 공분산 행렬을 생성하는 단계(S122), 공분산 행렬에 기초하여 고유값 문제를 구성하는 단계(S123) 및 고유값 문제에 소정의 커널함수를 적용하여 고유값, 고유벡터 및 비선형 주성분을 획득하는 단계(S124)를 포함한다.

[0042] 도 2c를 참조하면, 구조물의 손상 진단을 수행하는 단계(S130)는 주성분 데이터에 기초하여 극값분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따르는 통계적 모델을 생성하는 단계(S131) 및 통계적 모델에 기초하여 새롭게 입력된 전기 임피던스 신호와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교 결과에 기초하여 손상 여부를 진단하는 단계(S132)를 포함한다.

[0043] 이하에서는 주성분 분석 방법을 이용하여 온도 및 습도의 외부 환경영향에 의한 전기적 신호를 배제하고, 구조물(100)의 상태(균열)변화에 대한 전기적 변화만을 추출하는 방법에 대하여 상세히 설명하도록 한다.

[0044] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 주성분 분석 방법의 개념을 설명하기 위한 도면이다.

[0045] 여기서, 주성분 분석 방법은 다수의 변수를 소수의 요인으로 줄이는 것으로서, 다수의 변수간의 변화가 적은 수를 주성분으로 정의하는 것을 의미한다.

[0046] 전기 임피던스는 상태변화에 따라 변화하지만 환경적인 영향인 온도, 습도 변화에 있어서도 변화하는 양상을 가진다. 이러한 임피던스의 민감도는 실제 구조물(100)의 즉각적인 임피던스 계측에 있어서 오경보(false alarm)를 발생시킨다. 이러한 오경보를 줄이기 위해서 비선형 주성분 분석 기법을 사용해 데이터 정규화를 할 수 있다.

[0047] 즉, 주성분 분석 기법은 도 3에 도시된 바와 같이, 낮은 차원의 데이터를 고차원으로 변환시킨 후 변환된 데이터의 평균이 0이 되도록 한다. 이러한 과정을 거친 계측된 임피던스 데이터들은 비선형관계에서 고차원의 공간으로 확장시켜 선형으로 가정할 수 있으므로, 주성분 분석을 할 수 있다.

[0048] 먼저, 프로세서(30)는 주성분 분석을 실시하기 위하여 낮은 차원의 데이터를 고차원으로 변환시키는 비선형 변환함수인 아래의 수학식 3을 적용한다.

[0049] <수학식3>

[0050] $$\varphi(\bullet): R^m \rightarrow R^h (m < h)$$

[0051] 이어서, 프로세서(30)는 변환된 고차원 데이터를 이용해 수학식4와 같이 공분산 행렬을 생성한다.

[0052] <수학식4>

[0053] $$M_2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\varphi(x_j)\varphi(x_j)^T$$

[0054] 이때, $\rho(x_j)$는 비선형 특성벡터를 변환함수를 통해 변환시킨 것이며, 변환된 데이터를 이용해 공분산 행렬M_2를 도출할 수 있다.

[0055] 다음으로, 프로세서(30)는 공분산 행렬에 기초하여 수학식5와 같이, 고유값 문제를 구성한다.

[0056] <수학식5>

[0057] $$\lambda c = M_2 c$$

[0058] 여기서, λ와 c은 각각 고유값과 그에 해당하는 고유벡터이다. 또한 c은 위에서 언급한 고차원의 데이터를 확장시켜 선형으로 가정할 수 있으며, 아래의 수학식6과 같이, $\rho(x_j)$의 선형적인 다항식으로 표현이 가능하다. (i=1, …,N)

[0059] <수학식6>

[0060] $$c = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \varphi(x_i)$$

[0061] 여기서, α_i는 미지의 계수이고, 위의 수학식6의 양변에 $\rho(x_j)T$ 를 곱하면, 아래의 수학식7과 같은 또 다른 고유값 문제를 얻는다.

[0062] <수학식7>

[0063] $$N\lambda\alpha = K\alpha$$

$$K_{ij} \equiv \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = k(x_i, x_j)$$

[0064] 여기서, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_N]^T \in R^{N\times 1}$이고, 공분산 행렬 $K \in R^{N\times N}$으로 정의된다.

[0065] 다음으로, 프로세서(30)는 고유값 문제에 수학식8과 같이 소정의 커널함수 적용하여, 고유값, 고유벡터 및 비선형 주성분을 획득할 수 있다. 수학식7의 두 변환함수 $\rho(x_i)$와 $\rho(x_j)$는 비선형 변환이 가능하고, Mercer의 정리에 의해 커널(Kernel) 함수$k(x_i, x_j)$로 대체해 쉽게 계산할 수 있다.

[0066] <수학식8>

[0067] $$k(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\| x_i - x_j \|}{\rho^2}\right)$$

[0068] 여기서, 커널 함수 중 가우시안 커널(Gaussian kernel)을 이용하며, ρ는 가우시안 너비(Gaussian Width)로 사용자가 정의해야 하는 상수이다.

[0069] 또한, p개의 고유값에 해당하는 고유벡터를 수학식9와 같이,정규화 한다.

[0070] <수학식9>

[0071] $$(c_k^T c_k) = 1 \rightarrow N\lambda_k(\alpha_k^T \alpha_k) = 1, k = 1, \ldots, p$$

[0072] 여기서, λ_k와 α_k는 각각 수학식7에서 얻은 k번째 고유값과 고유벡터이다. 마지막으로, 특성벡터 x_i의 k번째 비선형 주성분 요소는 x_j를 k번째 고유벡터에 정사영시킴으로써 수학식10을 도출한다.

[0073] <수학식10>

[0074] $$KPC_k(x_j) = c_k^T \varphi(x_j) = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_k)_i k(x_i, x_j)$$

[0075] 여기서, $KPC_k(x_j)$와 $(\alpha_k)_i$, c_k는 각각 커널 주성분 분석을 통해 얻어진 특성벡터 x_i의 k번째 비선형 주성분, 고유값 및 고유벡터를 의미한다. 또한, $k(x_i, x_j)$는 선택된 커널함수이다. 비선형 변환 함수 ρ(·)를 이용할 경우 변환한 데이터의 평균을 0으로 정규화 시키면 K행렬을 보다 쉽게 계산하고, 이를 수학식11과 같이, K^*로 정

의할 수 있다. K^*행렬을 기존의 K행렬 대신 사용하면 보다 효율적으로 비선형 주성분 분석을 할 수 있다.

[0076] <수학식11>

$$K_{ij}^{*}=\left[\varphi(x_i)-\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\varphi(x_k)\right]^{T}\left[\varphi(x_j)-\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\varphi(x_k)\right]$$

$$=\varphi(x_i)^{T}\varphi(x_j)-\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\varphi(x_i)^{T}\varphi(x_k)-\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\varphi(x_k)^{T}\varphi(x_j)$$
$$+\frac{1}{N^2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}\varphi(x_k)^{T}\varphi(x_l)$$

$$=k(x_i,x_j)-\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}k(x_i,x_k)-\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}k(x_k,x_j)$$
$$+\frac{1}{N^2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}k(x_k,x_l)$$

[0077]

[0078] 이어서, 프로세서(30)는 입력된 주성분 데이터에 기초하여 극값분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따르는 통계적 모델을 생성한다.

[0079] 먼저, 비선형 주성분 분석을 기반으로 손상진단하기 위해서는 통계적 기법을 활용하여 임계값을 산정해야 한다. 극값분포의 Gumbel과 Frechet, Weibull 세 분포를 한 가지 분포로 일반화한 극값분포 및 각 분포는 아래의 수학식12 및 수학식13과 같다.

[0080] <수학식12>

$$Gumbel: F_G(x|\kappa,\delta)=\exp\left[-\left(\frac{x-\kappa}{\delta}\right)\right],-\infty<x<\infty \text{ and } \delta>0$$

$$Frechet: F_F(x|\kappa,\delta,\beta)=\begin{cases}\exp\left[-\left(\frac{\delta}{x-\kappa}\right)^{\beta}\right], & x\geq\kappa\\ 0, & otherwise\end{cases}$$

$$Weibull: F_W(x|\kappa,\delta,\beta)=\begin{cases}1, & x\geq\kappa\\ \exp\left[-\left(\frac{\delta}{x-\kappa}\right)^{\beta}\right], & otherwise\end{cases}$$

$$F_{GEV}(x|\mu,\sigma,\gamma)=\exp\left\{-\left[1+\gamma\left(\frac{x-\mu}{\delta}\right)\right]^{-1/\gamma}\right\}$$
$$-\sigma-\gamma(x-\mu)\leq 0,\sigma>0$$

[0081]

[0082] <수학식13>

$$(1)\,F_{GEV}(x|\mu,\sigma,\gamma)=F_G(x|\kappa,\delta)\,when\,\gamma\to 0,\mu=\kappa,\text{and}\,\sigma=\delta;$$
$$(2)\,F_{GEV}(x|\mu,\sigma,\gamma)=F_F(x|\kappa,\delta,\beta)\,when\,\gamma>\ 0,\mu=\kappa+\delta,\sigma=\frac{\delta}{\beta},$$
$$\text{and}\,\gamma=\frac{1}{\beta};$$
$$(3)\,F_{GEV}(x|\mu,\sigma,\gamma)=F_W(x|\kappa,\delta,\beta)\,when\,\gamma<\ 0,\mu=\kappa-\delta,\sigma=\frac{\delta}{\beta},$$
$$\text{and}\,\gamma=-\frac{1}{\beta}.$$

[0083]

[0084] 여기서, k와 δ, β는 각각 극값분포의 위치(location)와 스케일(scale), 형태(shape) 매개변수이다. 그리고 일반화된 극값분포의 μ와 σ, γ는 각각 확률분포의 위치와 스케일, 형태 매개변수를 나타낸다. Gumbel과 Frechet, Weibull분포는 이 매개변수들의 조합으로 모두 표현될 수 있다.

[0085] FRCCs(Fiber-reinforced Cementitious Composites)에 손상이 없을 때 측정된 데이터들로부터의 특성을 추출하고, 이들에 대해 GEV 분포를 따르는 통계적 모델을 생성한다. 이어서, 추정된 확률모델의 누적밀도함수

(Cumulative Density Function, CDF)를 계산한 후, 계산된 CDF를 이용해 신뢰구간을 설정한다. 마지막으로, 해당 신뢰도를 가지는 값을 임계값으로 설정한다.

[0086] 다음으로, 프로세서(30)는 통계적 모델에 기초하여 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교 결과에 기초하여 손상 여부를 진단할 수 있다.

[0087] 입력 데이터의 손상 지수(damage index)가 임계값을 초과하면 손상이 발생한 것으로 인지할 수 있다. 수학식14와 같이, 손상 지수는 주성분 분석을 통해서 데이터를 고차원으로 변형시킨 후 정사영 시킨 입력 데이터와 학습 데이터의 최소거리로 정의된다.

[0088] <수학식14>

[0089]
$$DI(j) = \min\left(\| \tilde{Z}_j - Z_l \|^2 \right) l = 1,2,\cdots,N$$
$$where\ \tilde{Z}_j = \left[\tilde{Z}^N_{1j} \tilde{Z}^N_{2j} \tilde{Z}^N_{3j} \cdots \tilde{Z}^N_{mj} \right]^T, Z_l = \left[\tilde{Z}^N_{1l} \tilde{Z}^N_{2l} \tilde{Z}^N_{3l} \cdots \tilde{Z}^N_{ml} \right]^T$$

[0090] 여기서, $\tilde{Z}^N_{ij}, \tilde{Z}^N_{il}$은 i번째 주성분 축 위에 정사영시킨 j번째 입력 데이터, l번째 학습 데이터를 의미한다. 이와 같은 머신 러닝 기반의 신호 처리를 통해 온도, 습도 등 환경영향에 의한 전기적 신호를 배제한 오직 상태변화만의 전기적 변화를 추출한다.

[0091] 이하에서는 도 4 내지 도 8을 참조하여 본 발명의 일 실시예에 따른 임피던스 신호에 비선형 주성분 분석 방법을 적용하여 외부 환경 변수인 온도 및 습도에 따른 영향을 최소화하는 방법에 대해서 실험 결과를 통해 좀 더 상세히 설명하도록 한다.

[0092] 실험 구성은 온도, 습도 영향성을 배제하기 위한 실험 셋업과 균열 발생에 따른 전기 임피던스 변화를 계측하기 위한 실험 셋업으로 구성하였다. 실험에 사용된 자가센싱 콘크리트는 위에서 명시한 섬유보강 시멘트 복합재료를 사용하였다.

[0093] 또한, 온도, 습도에 따른 전기 임피던스의 변화를 분석하기 위하여 표 1과 같은 조건으로 실험을 진행하였다. 온도, 습도의 영향에 따른 전기 임피던스 값은 복소수로 표현이 되는데, 그 중 실수부분은 저항 값을 대표하고 허수부분은 리액턴스 값을 대표한다.

[0094] <표 1>

[0095]

온도 (°C)	상대습도(%)
-10, 0, 10	0
20	40, 60, 80
30, 40	60

[0096] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 온도 및 습도에 따른 전기 임피던스의 변화를 분석하기 위한 저항 값 및 리액턴스 값을 나타낸 그래프이다. 즉, 도 4의 (a)는 온도 및 습도 변화에 따른 저항 값의 변화를 나타낸 것이고, 도 4의 (b)는 리액턴스 값의 변화를 나타낸 것이다.

[0097] 이때 다양한 주파수(Frequency)의 응답을 분석하기 위하여 주파수 스위핑(Frequency sweeping)을 사용하였고, 실제로 저항 및 리액턴스의 변화 양상은 가진 주파수에 따라 상이하게 나타나므로 이는 이어지는 머신 러닝 과정에서 보다 많은 정보를 학습할 수 있는 장점이 있다. 도4에 도시된 바와 같이, 온도 및 습도에 의하여 임피던스는 매우 민감하게 변화한다. 특히, 습도에 의한 전기 임피던스의 변화보다는 온도에 의한 전기 임피던스의 변화 값이 지배적인 것을 확인 할 수 있다.

[0098] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 휨 실험에 대한 힘-변위 곡선(Force-Displacement curve)을 나타낸 그래프이다. 도 6은 도 5의 구조물 손상 별 전기 임피던스의 변화를 분석하기 위한 저항 값 및 리액턴스 값을 나타낸 그래프이다.

[0099] 손상에 따른 전기 임피던스 변화를 확인하기 위하여 국제시험장비(Universal Testing Machine, UTM)을 활용, 3

점법 휨 실험을 통해 실시하였다.

[0100] 도 5에 도시된 바와 같이, 휨 실험에 대한 힘-변위 곡선은 4개의 상태변화로 나뉘며, 탄성 구간(닫힘 균열), 비탄성 구간(초기 열림 균열) 항복구간(다중 균열) 및 파괴구간으로 실험을 진행하였다.

[0101] 도 6은 도 5의 손상에 따른 전기 임피던스 변화 값의 결과를 도시한 것이며, 손상에 따른 전기 임피던스 값은 온도, 습도 변화에서 사용한 저항 값과 리액턴스 값을 사용하였다. 즉, 도 6의 (a)는 상태변화에 따른 저항 값의 변화를 나타낸 것이고, 도 6의 (b)는 리액턴스 값의 변화를 나타낸 것이다.

[0102] 실험 결과, 도6에 도시된 바와 같이 주파수 스위핑을 통해서 50~100Hz 구간에서 다양한 전기 임피던스 값을 확인할 수 있었다. 특히, 균열에 의한 임피던스 변화량 보다 온도에 따른 임피던스 변화량이 지배적임을 알 수 있고, 이는 앞서 설명한 바와 같이 균열정보만을 추출해내는데 방해요소로 작용하게 된다.

[0103] 따라서, 온도 및 습도에 따른 환경 영향을 배제하고 균열의 영향만을 추출해내기 위하여 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 모니터링 프로그램을 적용한다.

[0104] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 주성분 데이터에 기초하여 생성된 통계적 모델에 기초하여 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차를 나타낸 도면이다. 도 8은 도 7의 입력 데이터와 학습 데이터간의 거리차와 임계값과의 비교결과를 나타낸 도면이다.

[0105] 도 7을 참조하면, 주성분 데이터에 기초하여 생성된 통계적 모델에 기초하여 입력 데이터(test data)와 학습 데이터(training data)간 분석에 필요한 데이터로 나뉘며, 온도 및 습도에 대한 조건이 정리되어 있다.

[0106] 도 8은 상술한 구조물 모니터링 프로그램에 따라 처리된 리액턴스 값의 결과를 보여주고 있으며, 입력 데이터 31~34번 입력 데이터의 손상 지수(damage index)가 임계값을 초과하여 나타난 것을 알 수 있다. 즉, 입력 데이터31~34번 데이터만이 실시간으로 계산된 임계값을 초과함을 알 수 있다. 이는 온도 및 습도에 따른 나머지 환경영향에 의한 임피던스의 변화는 배제되었음을 의미한다.

[0107] 따라서, 본 발명의 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치 및 방법은 즉시적 임피던스 계측 및 분석이 가능하고, 사용자에게 실시간으로 온도 및 습도에 따른 외부환경변화와 관계없이 균열 발생 여부에 따른 손상 정보만을 전달할 수 있다. 이로 인해, 온도 및 습도에 따른 외부환경영향으로부터 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치의 오보를 최소한다는 효과가 있다.

[0108] 이상에서 설명한 본 발명의 실시예에 따른 자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치 및 방법은, 컴퓨터에 의해 실행되는 프로그램 모듈과 같은 컴퓨터에 의해 실행 가능한 명령어를 포함하는 기록 매체의 형태로도 구현될 수 있다. 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 매체를 모두 포함할 수 있다. 컴퓨터 저장 매체는 컴퓨터 판독가능 명령어, 데이터 구조, 프로그램 모듈 또는 기타 데이터와 같은 정보의 저장을 위한 임의의 방법 또는 기술로 구현된 휘발성 및 비휘발성, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함한다.

[0109] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 예를 들어, 단일형으로 설명되어 있는 각 구성 요소는 분산되어 실시될 수도 있으며, 마찬가지로 분산된 것으로 설명되어 있는 구성 요소들도 결합된 형태로 실시될 수 있다.

[0110] 또한, 본 발명의 방법 및 시스템은 특정 실시예와 관련하여 설명되었지만, 그것들의 구성 요소 또는 동작의 일부 또는 전부는 범용 하드웨어 아키텍처를 갖는 컴퓨터 시스템을 사용하여 구현될 수도 있다.

[0111] 본 발명의 범위는 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

부호의 설명

[0112] 1: 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치

10: 수신부

20: 메모리

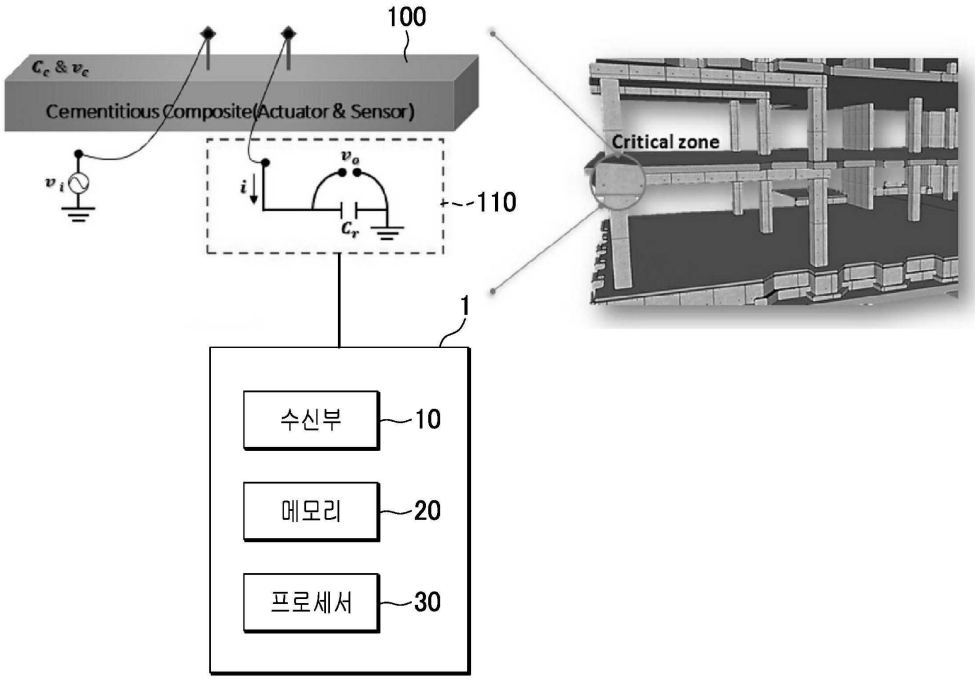
30: 프로세서

100: 구조물

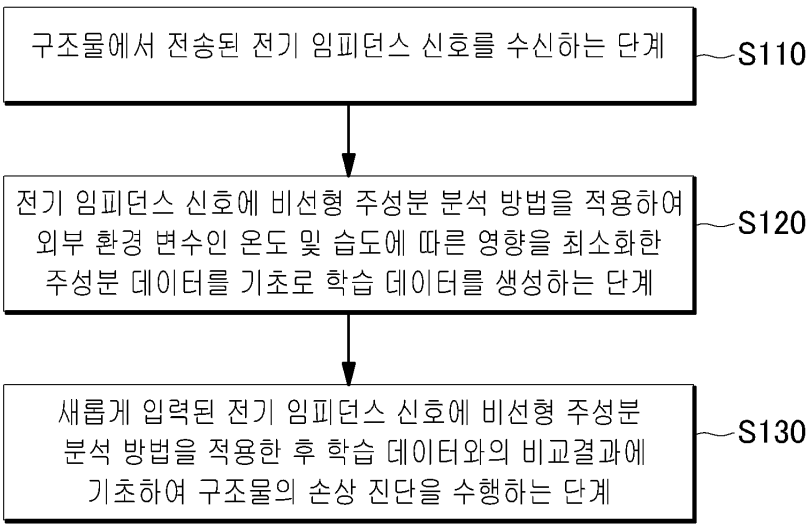
110: 자가 센싱 회로

도면

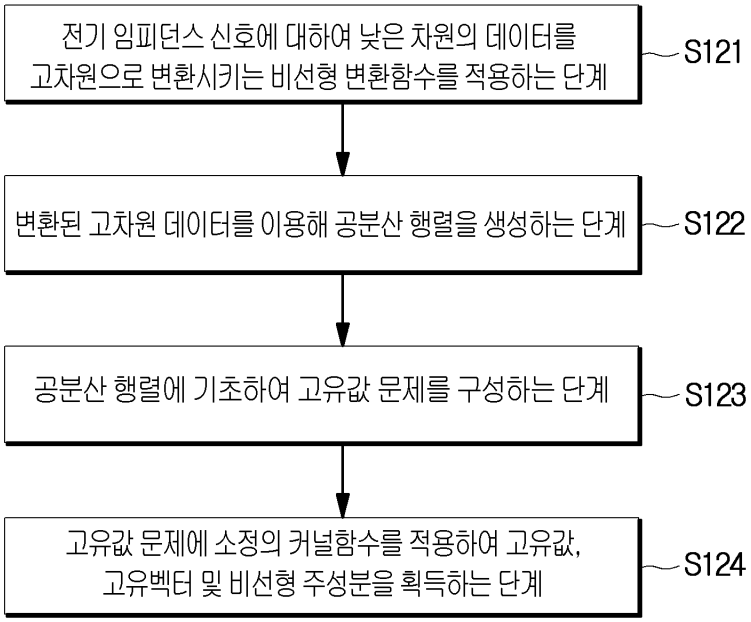
도면1



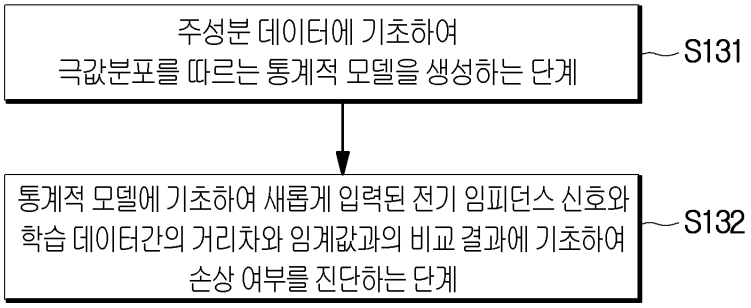
도면2a



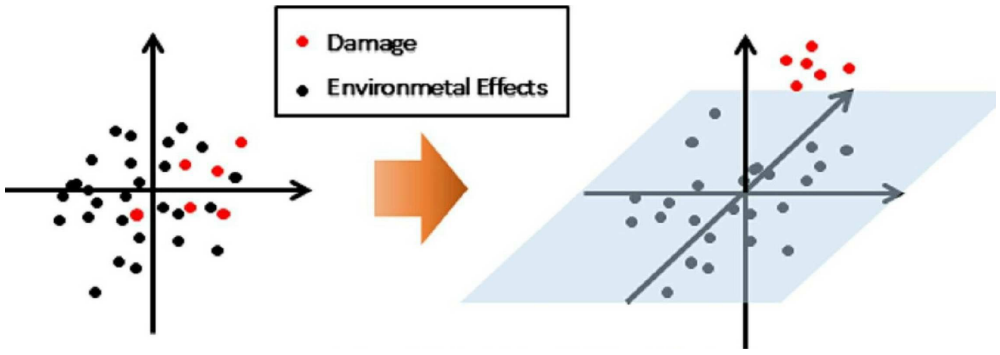
도면2b



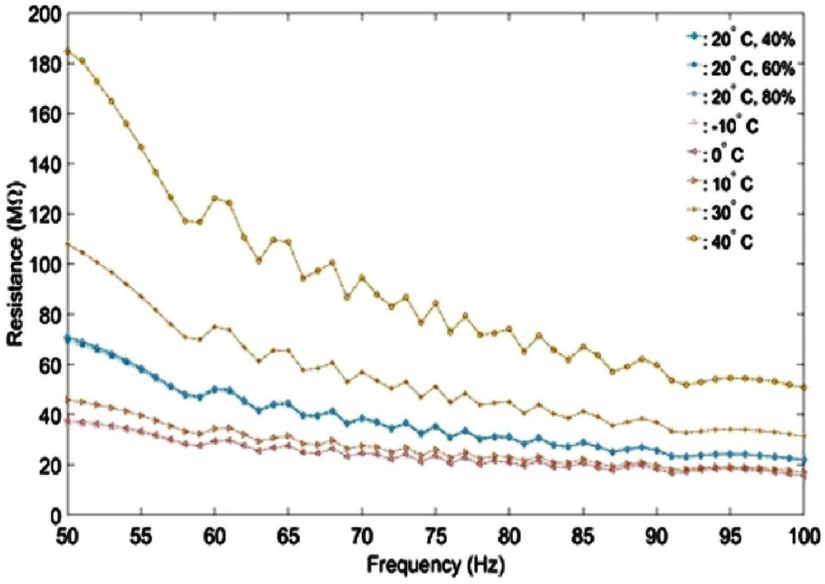
도면2c



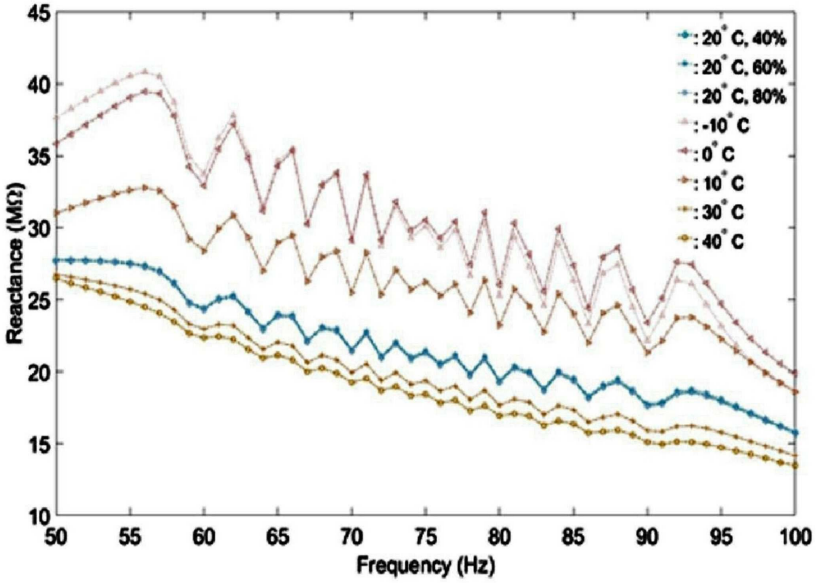
도면3



도면4

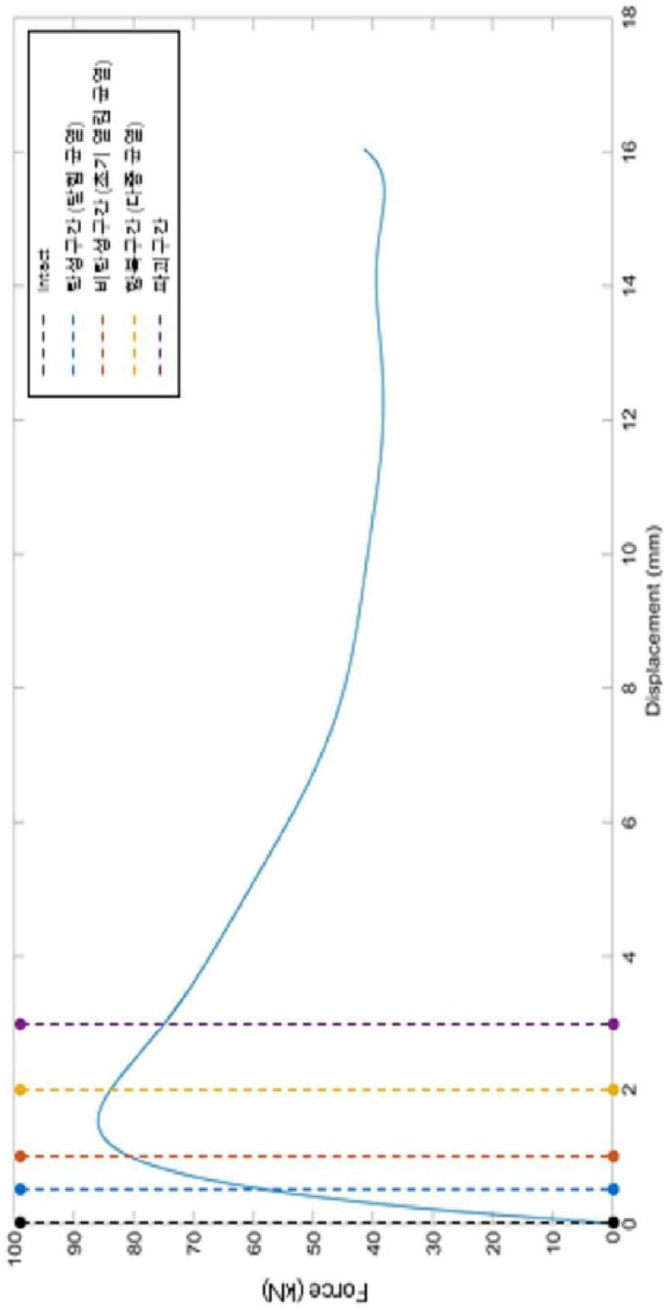

Resistance (MΩ)
Frequency (Hz)
: 20° C, 40%
: 20° C, 60%
: 20° C, 80%
: -10° C
: 0° C
: 10° C
: 30° C
: 40° C

(a)

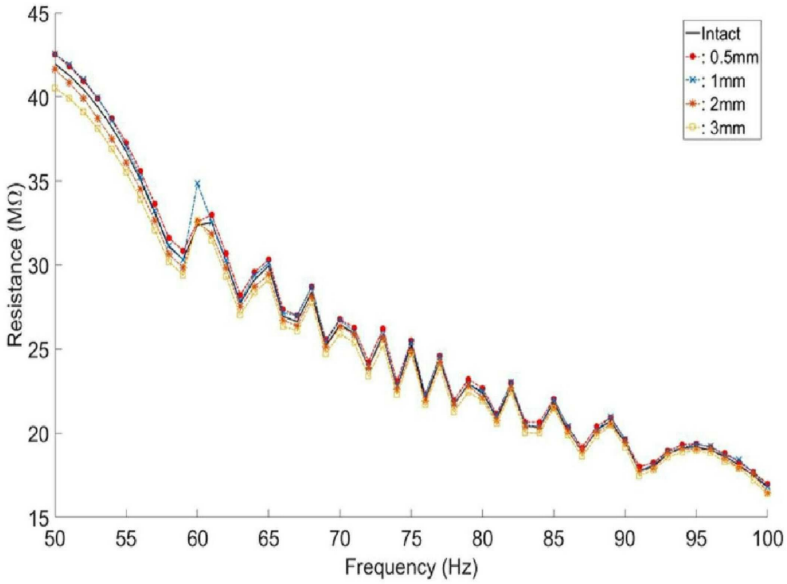

Reactance (MΩ)
Frequency (Hz)
: 20° C, 40%
: 20° C, 60%
: 20° C, 80%
: -10° C
: 0° C
: 10° C
: 30° C
: 40° C

(b)

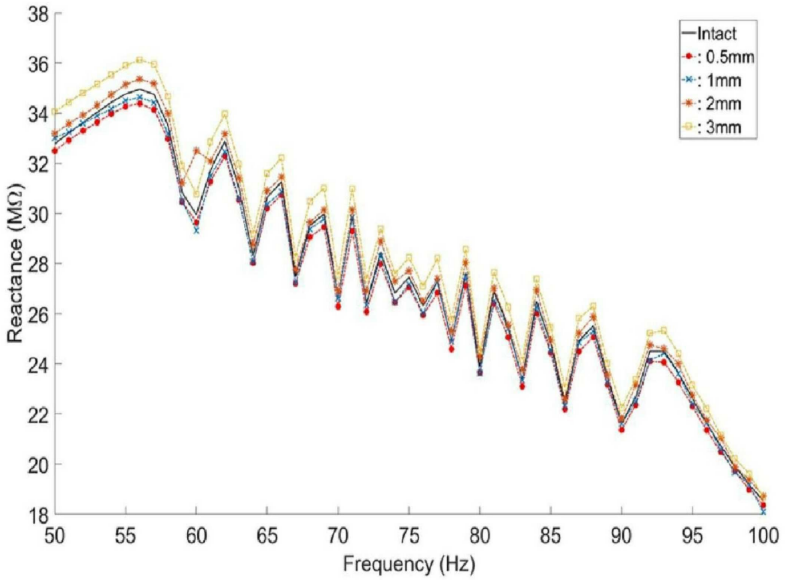
도면5


Intact
탄성구간 (탄림 구간)
비탄성구간 (초기 열림 구간)
항복구간 (다중 구간)
파괴구간
Force (kN)
Displacement (mm)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18

도면6


Intact
: 0.5mm
: 1mm
: 2mm
: 3mm
Resistance (MΩ)
Frequency (Hz)
45
40
35
30
25
20
15
50
55
60
65
70
75
80
85
90
95
100

(a)


Intact
: 0.5mm
: 1mm
: 2mm
: 3mm
Reactance (MΩ)
Frequency (Hz)
38
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
50
55
60
65
70
75
80
85
90
95
100

(b)

도면7

온도 (℃)	습도 (%)	변위 (mm)	데이터 번호	
-10	0	0	1~4	
0	0	0	5~8	
10	0	0	9~12	
20	40	0	25~27	Training Data
20	60	0	13~16	
20	80	0	28~30	
30	60	0	17~20	
40	60	0	21~24	
5	30	0.5	31	
5	30	1	32	Test Data
5	30	2	33	
5	30	3	34	

도면8

