(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년04월01일
(11) 등록번호 10-2095751
(24) 등록일자 2020년03월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01V 1/30 (2006.01) *G01B 21/32* (2006.01)
G01V 1/22 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01V 1/30 (2013.01)
G01B 21/32 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0060478
(22) 출원일자 2019년05월23일
심사청구일자 2019년05월23일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020050081630 A
JP2009003907 A
JP2004264235 A
KR101206044 B1

(73) 특허권자
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
이종재
서울특별시 광진구 능동로 209, 세종대학교 충무관 710호 (군자동)
김세훈
서울특별시 광진구 능동로 209, 세종대학교 충무관 710A호 (군자동)
(74) 대리인
유병욱, 한승범

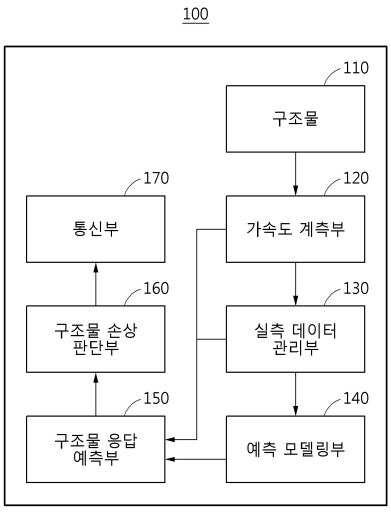
전체 청구항 수 : 총 11 항 심사관 : 김홍래

(54) 발명의 명칭 **구조물 손상 감지 시스템 및 방법**

(57) 요 약

본 발명에 따른 구조물 손상 감지 시스템은, 구조물에 가해지는 외부 하중에 대한 구조물의 하부층에 대한 가속도 응답과 구조물의 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 선형 상관관계를 모델링하고, 상기 하부층에 대한 가속도 응답과 상기 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 상기 선형 상관관계로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서, 새로운 외부 하중이 구조물에 가해지는 경우에 측정된 구조물 가속도 응답과 상기 예측 모델 또는 인공지능 모델을 이용하여 예측된 구조물 가속도 응답 사이의 선형 상관관계의 동일 여부로부터 구조물의 손상 유무를 판단할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G01V 1/22 (2013.01)
G01V 2210/622 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1615010794
부처명 국토교통부
연구관리전문기관 국토교통과학기술진흥원
연구사업명 국토교통기술지역특성화(R&D)
연구과제명 호남지역 중소형 교량 통합 관리를 위한 멀티스케일 모니터링 시스템 기술개발
기 여 율 1/1
주관기관 전남대학교산학협력단
연구기간 2019.01.01 ~ 2019.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

구조물에 가해지는 외부 하중에 대한 구조물의 하부층에 대한 가속도 응답과 구조물의 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 선형 상관관계를 모델링하고,

상기 하부층에 대한 가속도 응답과 상기 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 상기 선형 상관관계로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서, 새로운 외부 하중이 구조물에 가해지는 경우에 측정된 구조물 가속도 응답과 상기 예측 모델 또는 인공지능 모델을 이용하여 예측된 구조물 가속도 응답 사이의 선형 상관관계의 동일 여부로부터 구조물의 손상 유무를 판단하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

구조물에 설치되며, 구조물에 가해지는 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 측정하는 가속도 계측부;

상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하고, 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터를 상기 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서 상기 입력 데이터와 상기 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 예측 모델링부;

구조물에 새로운 외부 하중이 가해지는 경우 상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터 중 입력 데이터를 상기 예측 모델링부에 입력하여 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 예측하는 구조물 응답 예측부; 및

상기 구조물 응답 예측부에서 예측된 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답과 상기 가속도 계측부에서 측정된 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 비교하여 구조물의 손상 여부를 판단하는 구조물 손상 판단부;를 포함하며,

상기 구조물 손상 판단부는 예측된 구조물 가속도 응답과 측정된 가속도 응답을 비교하여 상기 선형 상관관계가 비선형 상관관계 또는 다른 선형 상관관계로 변한 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 가속도 계측부는,

상기 구조물 중 상기 구조물이 위치하는 지면과 가까운 부위에 마련되는 제1 계측부 및 상기 제1 계측부가 마련된 위치 보다 상부층에 마련되는 제2 계측부를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하는 실측 데이터 관리부를 더 포함하고,

상기 실측 데이터 관리부는,

상기 제1 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답을 입력 데이터로 정의하고, 상기 제2 계측부에서 측정된 구조

물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하는 실측 데이터 관리부를 더 포함하고,

상기 실측 데이터 관리부는,

이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답 및 상기 외부 하중을 입력 데이터로 정의하고, 다음 시간 단계에서 측정된 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 6

제4항 또는 제5항에 있어서,

상기 예측 모델링부는,

상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터를 이용하여 학습하되, 선형회귀기법, 기계학습 알고리즘 또는 딥러닝 알고리즘을 이용하여 상기 구조물 가속도 응답을 예측하는 예측 모델 또는 인공지능 모델을 생성하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 구조물 손상 판단부는,

상기 이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답이 상기 예측 모델링부에 입력되어 예측된 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서의 구조물 가속도 응답과, 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE)로부터 구조물의 손상 여부를 판단하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 구조물 손상 판단부는,

임계값=1-특정 NMSE값이 되도록 임계값을 정의하고 NMSE값이 임계값을 초과하는 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 시스템.

청구항 9

제8항에 따른 구조물 손상 감지 시스템을 사용한 구조물 손상 감지 방법에 있어서,

구조물에 가속도 계측부를 설치하는 단계;

상기 가속도 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답을 얻는 단계;

구조물 가속도 응답을 이용하여 인공지능 모델을 학습시키는 단계;

인공지능 모델의 학습결과를 이용하여 예측 모델링부를 생성하는 단계;

상기 예측 모델링부를 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 단계; 및

구조물의 손상 여부를 판단하는 단계;를 포함하며,

상기 인공지능 모델을 학습시키는 단계는,

이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답을 입력 데이터로 정의하고 다음 시간 단계에서 측정된 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의하여 인공지능 모델을 학습시키는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계는,

예측된 구조물 가속도 응답과 측정된 가속도 응답을 비교하여 상기 예측 모델링부에 입력되는 입력 데이터와 상기 예측 모델링부에서 출력되는 출력 데이터 사이의 선형 상관관계가 동일하게 유지되는지를 판단하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계는,

상기 이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답이 상기 예측 모델링부에 입력되어 예측된 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서의 구조물 가속도 응답과, 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE)로부터 구조물의 손상 여부를 판단하는 것을 특징으로 하는 구조물 손상 감지 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 구조물 손상 감지 시스템 및 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 지진 등 외부 하중이 건축물 등 구조물에 작용한 경우에 구조물의 손상 발생 유무를 실시간으로 조기에 감지하고 경보할 수 있는 구조물 손상 감지 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 최근 토목구조물 및 건축물이 장대화되고, 초대형화되면서 지진 및 태풍 등의 재해 발생 시 대규모의 피해 발생의 증가가 예상되면서 구조물의 안전을 위한 내진성능 검토 및 계측을 통한 구조성능 이력 관리나 손상평가 등에 대한 기술개발이 증대되고 있다.

[0003] 재해 관련 구조안전성의 확보를 위해 보유내력 및 구조성능을 평가할 수 있는 비선형 해석기술이 개발되고 있으며, 이를 통해 지진 및 지진 피해 영향을 예측하는 기법도 연구되고 있다.

[0004] 또한 구조물에 여러 가지 계측기기, 예를 들어 가속도계, 처짐계, 경사계, 변형률계 등을 설치하여, 각각의 계측기기로부터 계측된 데이터를 바탕으로 관리한계를 설정하여 구조물의 이상발생 유무를 관리하고 필요시 대응 시나리오를 제시하는 기술도 개발되고 있다.

[0005] 이와 함께 구조물의 손상 정도를 정량적으로 분석하고 합리적인 대응방안을 수립하기 위하여 구조물 식별 기술에 기반한 손상탐지 기법이 적용되기도 한다.

[0006] 그러나 기존의 구조물 식별 기술에 기반한 손상평가 기법은 구조물 자체의 해석과 응답데이터의 해석이 동시에

이루어져야 하기 때문에 실시간 손상평가가 어렵고, 복잡하게 구성된 다수의 계측기기로 이루어진 시스템을 기반으로 정밀 손상평가에 치중함으로써 시스템 구축에 많이 비용과 시간이 소요되는 문제점이 있다.

[0007] 특히, 지진이 발생한 경우 구조물에 손상이 발생할 수 있는데, 손상 발생한 구조물에 사람이 출입하거나 손상된 구조물을 방치하는 경우에는 2차적인 피해가 발생할 수 있다. 그런데, 기존의 기술들은 지진의 규모 또는 지진의 발생 여부를 감지하여 사전에 경보하는 것에 관심을 둘 뿐이고 지진이 발생한 후 구조물에 손상이 발생하였는지를 알려 주는 것에는 관심을 두지 않고 있다.

[0008] 따라서, 지진 또는 재난에 의한 외부 하중이 구조물에 가해진 경우에 구조물의 손상 발생 여부를 조기에 감지해서 사람들에게 알려 줄 수 있는 기술이 필요하다.

[0009] 본 출원인은, 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명을 제안하게 되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0010] (특허문헌 0001) 한국공개특허 제10-2015-0035633호(2015.04.07.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 제안된 것으로, 지진 등 외부 하중이 구조물에 가해진 후에 구조물에 손상이 발생했는지 여부를 조기에 감지할 수 있는 구조물 손상 감지 시스템 및 방법을 제공한다.

[0012] 본 발명은 지진 등 외부 하중이 구조물에 가해진 경우에 구조물에 손상이 발생했는지를 판단하기 위해 구조해석을 할 필요가 없으며 설치 및 운영이 쉽고 유지보수비용을 줄일 수 있는 구조물 손상 감지 시스템 및 방법을 제공한다.

[0013] 본 발명은 지진 등 외부 하중이 구조물에 가해지는 경우에 구조물의 가속도 응답만 측정하여도 정확하고 신속하게 구조물의 손상 발생 여부를 감지할 수 있는 구조물 손상 감지 시스템 및 방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0014] 상기한 바와 같은 과제를 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템은, 구조물에 가해지는 외부 하중에 대한 구조물의 하부층에 대한 가속도 응답과 구조물의 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 선형 상관관계를 모델링하고, 상기 하부층에 대한 가속도 응답과 상기 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 상기 선형 상관관계로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서, 새로운 외부 하중이 구조물에 가해지는 경우에 측정된 구조물 가속도 응답과 상기 예측 모델 또는 인공지능 모델을 이용하여 예측된 구조물 가속도 응답 사이의 선형 상관관계의 동일 여부로부터 구조물의 손상 유무를 판단할 수 있다.

[0015] 상기 구조물 손상 감지 시스템은, 구조물에 설치되며, 구조물에 가해지는 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 측정하는 가속도 계측부; 상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하고, 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터로 상기 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서 상기 입력 데이터와 상기 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 예측 모델링부; 구조물에 새로운 외부 하중이 가해지는 경우 상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터 중 입력 데이터를 상기 예측 모델링부에 입력하여 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 예측하는 구조물 응답 예측부; 및 상기 구조물 응답 예측부에서 예측된 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답과 상기 가속도 계측부에서 측정된 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 비교하여 구조물의 손상 여부를 판단하는 구조물 손상 판단부;를 포함하며, 상기 구조물 손상 판단부는 예측된 구조물 가속도 응답과 측정된 가속도 응답을 비교하여 상기 선형 상관관계가 비선형 상관관계 또는 다른 선형 상관관계로 변한 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

[0016] 상기 가속도 계측부는, 상기 구조물 중 상기 구조물이 위치하는 지면과 가까운 부위에 마련되는 제1 계측부 및 상기 제1 계측부가 마련된 위치 보다 상부층에 마련되는 제2 계측부를 포함할 수 있다.

[0017] 상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하는 실측 데이터 관리부를 더 포함하고, 상기 실측 데이터 관리부는, 상기 제1 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답을 입력 데이터로 정의하고, 상기 제2 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의할 수 있다.

[0018] 상기 가속도 계측부에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하는 실측 데이터 관리부를 더 포함하고, 상기 실측 데이터 관리부는, 이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답 및 상기 외부 하중을 입력 데이터로 정의하고, 다음 시간 단계에서 측정된 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의할 수 있다.

[0019] 상기 예측 모델링부는, 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터를 이용하여 학습하되, 선형회귀기법, 기계학습 알고리즘 또는 딥러닝 알고리즘을 이용하여 상기 구조물 가속도 응답을 예측하는 예측 모델 또는 인공지능 모델을 생성할 수 있다.

[0020] 상기 구조물 손상 판단부는, 상기 이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답이 상기 예측 모델링부에 입력되어 예측된 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서의 구조물 가속도 응답과, 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE)로부터 구조물의 손상 여부를 판단할 수 있다.

[0021] 상기 구조물 손상 판단부(160)는, 임계값=1-특정 NMSE값이 되도록 임계값을 정의하고 NMSE값이 임계값을 초과하는 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

[0022] 한편, 발명의 다른 분야에 의하면, 본 발명은 상기한 구조물 손상 감지 시스템을 사용한 구조물 손상 감지 방법에 있어서, 구조물에 가속도 계측부를 설치하는 단계; 상기 가속도 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답을 얻는 단계; 구조물 가속도 응답을 이용하여 인공지능 모델을 학습시키는 단계; 인공지능 모델의 학습결과를 이용하여 예측 모델링부를 생성하는 단계; 상기 예측 모델링부를 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 단계; 및 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계;를 포함하며, 상기 인공지능 모델을 학습시키는 단계는, 이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답을 입력 데이터로 정의하고 다음 시간 단계에서 측정된 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의하여 인공지능 모델을 학습시키는 구조물 손상 감지 방법을 제공할 수 있다.

[0023] 상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계는, 예측된 구조물 가속도 응답과 측정된 가속도 응답을 비교하여 상기 예측 모델링부에 입력되는 입력 데이터와 상기 예측 모델링부에서 출력되는 출력 데이터 사이의 선형 상관관계가 동일하게 유지되는지를 판단할 수 있다.

[0024] 상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계는, 상기 이전 시간 단계에서 측정된 상기 제1 계측부 및 상기 제2 계측부의 구조물 가속도 응답이 상기 예측 모델링부에 입력되어 예측된 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서의 구조물 가속도 응답과, 상기 다음 시간 단계에서 상기 제2 계측부에서 측정된 구조물 가속도 응답의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE)로부터 구조물의 손상 여부를 판단할 수 있다.

발명의 효과

[0025] 본 발명에 따른 구조물 손상 감지 시스템 및 방법은 외부 하중에 대한 구조물의 가속도 응답만을 계측하여 구조물의 손상 여부를 조기에 판단할 수 있다.

[0026] 본 발명에 따른 구조물 손상 감지 시스템 및 방법은 외부 하중에 대한 구조물의 손상 여부를 판단하기 위해서 구조 해석을 할 필요가 없기 때문에 구조물 손상 여부를 판단하는데 필요한 연산 시간을 줄일 수 있으며 그 결과 신속하게 구조물 손상 여부를 판단할 수 있다.

[0027] 본 발명에 따른 구조물 손상 감지 시스템 및 방법은 구조물의 손상 여부를 판단하기 위해서 이종의 센서 또는 다수의 센서를 사용할 필요가 없기 때문에 유지 보수 비용을 줄일 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템의 구성을 개략적으로 도시한 블록도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템이 구조물에 설치된 상태를 예시적으로 보여주는 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템의 정확성을 검증하기 위한 수치해석 모델을 보여

주는 도면이다.

도 4 및 도 5는 도 3에 따른 수치해석 모델에서 얻은 구조물 가속도 응답의 예측값과 실측값을 보여주는 데이터이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 방법을 설명하기 위한 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명이 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0030] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템의 구성을 개략적으로 도시한 블록도, 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템이 구조물에 설치된 상태를 예시적으로 보여주는 도면, 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템의 정확성을 검증하기 위한 수치해석 모델을 보여주는 도면, 도 4 및 도 5는 도 3에 따른 수치해석 모델에서 얻은 구조물 가속도 응답의 예측값과 실측값을 보여주는 데이터, 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 방법을 설명하기 위한 순서도이다.

[0031] 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템 및 방법은, 지진 또는 바람 등과 같은 자연재해에 의한 외부 하중이 건물 등 구조물에 가해지거나, 자연재해 외에 인공적으로 발생하는 외부 하중이 구조물에 가해지는 경우에 구조물에 손상이 발생했는지 여부를 조기에 감지하여 알려 줄 수 있다. 이하에서 "외부 하중"은 지진 등 자연재해에 의한 외부 하중과 인공적으로 발생하는 외부 하중을 모두 포함하는 개념이다.

[0032] 한편, 설명의 편의를 위해서, 이하에서는 지진에 의한 외부 하중이 구조물에 가해지는 경우에 대해서 설명한다.

[0033] 도 1 및 도 2를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은, 구조물(110)에 가해지는 외부 하중(F)에 대한 구조물(110)의 하부층에 대한 가속도 응답과 구조물(110)의 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 선형 상관관계를 모델링하고, 상기 하부층에 대한 가속도 응답과 상기 상부층에 대한 가속도 응답 사이의 상기 선형 상관관계로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서, 새로운 외부 하중이 구조물(110)에 가해지는 경우에 측정된 구조물 가속도 응답과 상기 예측 모델 또는 인공지능 모델을 이용하여 예측된 구조물 가속도 응답 사이의 선형 상관관계의 동일 여부로부터 구조물의 손상 유무를 판단할 수 있다.

[0034] 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은, 구조물(110)에 설치되며, 구조물(110)에 가해지는 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 측정하는 가속도 계측부(120); 가속도 계측부(120)에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하는 실측 데이터 관리부(130); 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서 상기 입력 데이터와 상기 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 예측 모델링부(140); 구조물(110)에 새로운 외부 하중이 가해지는 경우 가속도 계측부(120)에서 측정된 가속도 응답 데이터 중 입력 데이터를 예측 모델링부(140)에 입력하여 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 예측하는 구조물 응답 예측부(150); 및 구조물 응답 예측부(150)에서 예측된 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답과 가속도 계측부(120)에서 측정된 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 비교하여 구조물(110)의 손상 여부를 판단하는 구조물 손상 판단부(160);를 포함할 수 있다.

[0035] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 구조물 손상 판단부(160)의 판단 결과 즉, 구조물(110)에 손상이 발생했는지 여부를 구조물(110)의 사용자 또는 관리자에게 전달하는 통신부(170)를 더 포함할 수 있다.

[0036] 통신부(170)는 사용자 또는 관리자의 단말, 서버 등과 네트워크를 통해 연결될 수 있다. 네트워크는 단말들 및 서버들과 같은 각각의 노드 상호간에 정보 교환이 가능한 연결 구조를 의미하는 것으로, 이러한 네트워크의 일 예에는, 3GPP(3rd Generation Partnership Project) 네트워크, LTE(Long Term Evolution) 네트워크, 5G 네트워크, WIMAX(World Interoperability for Microwave Access) 네트워크, 인터넷(Internet), LAN(Local Area Network), Wireless LAN(Wireless Local Area Network), WAN(Wide Area Network), PAN(Personal Area Network), wifi 네트워크, 블루투스(Bluetooth) 네트워크, 위성 방송 네트워크, 아날로그 방송 네트워크, DMB(Digital Multimedia Broadcasting) 네트워크 등이 포함되나 반드시 이에 한정되지는 않는다.

[0037] 또한, 사용자 또는 관리자의 단말(미도시)은 통신부(170)로부터 구조물의 손상 여부에 따른 경보 알람을 수신하여 출력할 수 있다. 사용자 단말은 예를 들면, 스마트폰(Smartphone), 스마트패드(SmartPad), 태블릿 PC등과

PCS(Personal Communication System), GSM(Global System for Mobile communication), PDC(Personal Digital Cellular), PHS(Personal Handyphone System), PDA(Personal Digital Assistant), IMT(International Mobile Telecommunication)-2000, CDMA(Code Division Multiple Access)-2000, W-CDMA(W-Code Division Multiple Access), Wibro(Wireless Broadband Internet) 단말기 같은 모든 종류의 무선 통신 장치 및 데스크탑 컴퓨터, 스마트 TV 등 유선 통신 장치를 포함할 수 있다.

[0038] 뿐만 아니라, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 통신부(170)와 네트워크로 연결되는 IoT 장치부(미도시)를 더 포함할 수 있다. 상기 IoT 장치부는 통신부(170)로부터 수신된 구조물 손상 여부에 따른 경보 알람을 출력할 수 있다. 예를 들어, 상기 IOT 장치부는 인공지능 스피커, 스마트 워치, 전기 차단 장치, 가스 차단 장치, LED 램프 모듈, 도어 개폐 장치, 가구 잠금 장치 등의 다양한 매체 및 장치를 포함할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0039] 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 지진 등 외부 하중이 발생한 경우에 지진 등이 발생했음을 미리 알려주는 것이 아니라 지진 등 외부 하중이 발생한 이후에 구조물에 손상이 발생했는지 여부를 조기에 감지하여 미리 알려주기 위한 것이다. 예를 들면, 지진 등 외부 하중에 의해 구조물에 흔들림 등이 발생하게 되면 구조물이 파괴되는 등 손상이 발생할 수 있다. 이러한 구조물의 손상을 구조물의 외부에 직접 육안으로 확인할 수 있다면 사용자나 관리자가 구조물에 출입하거나 구조물을 사용하는 것을 막을 수 있지만, 구조물에 손상이 발생했지만 구조물의 외부에서 육안으로 확인되지 않는 경우에는 사용자 또는 관리자가 구조물에 출입하거나 구조물을 사용할 수도 있다. 하지만, 육안으로 확인되지 않아도 구조물에 손상이 발생한 경우에는 붕괴 등 2차 피해의 우려가 있기 때문에 사용자 또는 관리자가 구조물에 출입하거나 구조물을 사용하는 것을 막는 것이 바람직하다. 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 육안으로 보이지 않는 구조물의 손상 여부도 감지하여 미리 알려줄 수 있기 때문에 2차 피해를 미연에 방지할 수 있다.

[0040] 상기 가속도 계측부(120)는 구조물(110)에 설치되는 것으로서 외부 하중이 구조물(110)에 가해지는 경우에 구조물(110)이 흔들리는 정도를 실시간으로 측정 내지 계측할 수 있다. 즉, 가속도 계측부(120)는 지진 등 외부 하중에 의해서 구조물(110)이 위치하는 지반 또는 구조물(110)의 흔들림을 가속도로 측정하는 센서이다. 여기서, 가속도 계측부(120)는 지진 등 외부 하중으로 인한 구조물 및 구조물 주변 자유장(가속도계측 대상 구조물의 지반운동을 대표할 수 있도록 건축물이나 구조물 등 일반적인 시설물 등이 없는 지표면을 의미함)의 가속도를 계측하여 기록, 저장, 처리 등을 하기 위한 것으로서, 가속도계측센서, 가속도기록계, 계측데이터 처리시스템, 통신기기 및 부대설비로 구성된 일체의 장비를 의미한다.

[0041] 한편, 도 2에 도시된 바와 같이, 가속도 계측부(120)는 구조물(110) 중 구조물(110)이 위치하는 지면과 가까운 부위에 마련되는 제1 계측부(121) 및 제1 계측부(121)가 마련된 위치 보다 상부층에 마련되는 제2 계측부(123)를 포함할 수 있다.

[0042] 도 2에는 구조물(110)의 기초 구조가 도시되어 있다. 도 2에 도시된 구조물(110)이 층상 구조의 건축물이라고 할 때 각 층의 바닥을 형성하는 슬라브(114)는 4개의 기둥부재(112)에 의해서 지지될 수 있다. 기둥부재(112)의 하부는 지표면의 하부에 위치하여 기초층(116)을 형성하고 기초층(116)의 위쪽에는 건축물의 1층(118)이 된다.

[0043] 상기한 바와 같이, 가속도 계측부(120)는 구조물(110)이 위치하는 지면과 가까운 부위에 마련되는 제1 계측부(121) 및 제1 계측부(121)가 마련된 위치 보다 상부층에 마련되는 제2 계측부(123)를 포함할 수 있다. 도 2의 경우, 제1 계측부(121)는 건축물의 1층에 설치되어 있고 제2 계측부(123)는 건축물의 2층에 설치되어 있다.

[0044] 여기서, 제1 계측부(121)는 건축물 즉 구조물(110)의 1층(118)에 설치될 뿐만 아니라 구조물(111)의 기초층(116)에도 설치될 수 있고, 제2 계측부(123)는 제1 계측부(121)가 설치된 층 보다 높은 상부층에 설치되는 것이 바람직하다. 도 2의 경우 제2 계측부(123)는 구조물(110)의 2층에 설치되어 있는데 반드시 2층에 설치되어야 하는 것은 아니며, 제1 계측부(121)가 설치된 위치 보다 상부층에 설치되면 된다.

[0045] 도 2에서 도면부호 "F"는 구조물(110)에 가해지는 지진 등이 외부 하중을 의미한다.

[0046] 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 구조물(110)에 설치된 적어도 2개의 가속도 계측부(121,123)를 이용하여 구조물(110)이 외부 하중(F)에 의해서 손상을 입었는지 여부를 감지할 수 있다.

[0047] 제1 계측부(121)는 구조물(110)의 기초층(116)에 작용하는 외부 하중(F)에 의해서 기초층(116) 또는 1층(118)의 흔들림에 의한 가속도를 측정하고, 제2 계측부(123)는 구조물(110)의 기초층(116)에 작용하는 외부 하중(F)에 의해서 상부층 즉, 제2 계측부(123)가 설치된 층의 흔들림에 의한 가속도를 측정할 수 있다. 이때, 제2 계측부(123)가 설치된 상부층의 흔들림은 그 하부층의 흔들림 뿐만 아니라 기초층의 흔들림으로부터 영향을 받을 수

있다.

[0048] 제1 및 제2 계측부(121,123)를 포함하는 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물(110)의 흔들림에 의한 가속도는 구조물 가속도 응답이라고 한다. 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물 가속도 응답은 실측 데이터 관리부(130)로 보내질 수 있다.

[0049] 실측 데이터 관리부(130)는, 미리 설정된 측정 시간 간격에 따른 시간 단계마다 가속도 계측부(120)에서 측정된 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 전달 받아 데이터로 저장하고, 저장된 구조물 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 분류할 수 있다. 즉, 실측 데이터 관리부(130)는 구조물 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하는 일종의 서버라고 할 수도 있다.

[0050] 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 구조물 가속도 응답을 이용하여 학습된 예측 모델 또는 인공지능 모델을 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측할 수 있는 예측 모델링부(140)를 구비하는데, 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물 가속도 응답 중 일부는 입력 데이터로 사용되고 다른 일부는 출력 데이터로 사용되어 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시키게 된다. 실측 데이터 관리부(130)는 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물 가속도 응답 데이터를 입력 데이터와 출력 데이터로 분류 또는 정의하고, 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의된 구조물 가속도 응답 데이터를 이용하여 예측 모델링부(140)에서 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시킬 수 있다.

[0051] 다만, 실측 데이터 관리부(130)가 가속도 계측부(120)에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하는 대신, 실측 데이터 관리부(130)를 생략하고 예측 모델링부(140)가 가속도 계측부(120)에서 측정된 가속도 응답 데이터를 입력 데이터 및 출력 데이터로 정의하거나 분류하고 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서 상기 입력 데이터와 상기 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 것도 가능하다.

[0052] 한편, 예측 모델링부(140)는 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터를 이용하여 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서 상기 입력 데이터와 상기 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링할 수 있다.

[0053] 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)이 적용되는 구조물(110)은 외부 하중에 의한 손상을 받기 전에는 선형 시스템이다. 구조물(110)에 손상이 없을 경우, 기초층(116)에 외부 하중이 가해지면 1층이 흔들리는 정도를 나타내는 가속도 응답과 2층이 흔들리는 정도를 나타내는 가속도 응답 사이에 선형 관계가 성립된다. 그런데, 외부 하중에 의해서 구조물(110)에 손상이 발생하면 그 선형 관계가 비선형 관계로 변하거나 초기와 다른 선형 관계로 변하게 된다.

[0054] 구조물(110)이 손상이 없는 선형 시스템인 경우에, 선형 시스템의 응답은 구조물의 운동방정식을 수치적으로 계산하여 얻을 수 있다.

[0055] 선형 시스템의 운동 방정식은 [수학식 1]과 같이 표현될 수 있다.

수학식 1

[0056] $$p = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku$$

[0057] [수학식 1]에서 p는 구조물에 가해지는 외부 하중, $\ddot{u}$은 가속도, $\dot{u}$는 속도, u는 변위, c는 구조물의 감쇠계수, k는 강성계수이다.

[0058] 뉴마크 베타 기법(Newmark beta method)은 대표적인 수치적분기법인데, 다음 시간 단계에서의 구조물 가속도 응답(u_{i+1})을 이전 시간 단계들에서의 구조물 가속도 응답(u_i, u_{i-1}, u_{i-2})과 외부 하중(p_i)을 이용하여 계산하는 기법이다. 뉴마크 베타 기법의 계산 과정은 다음과 같다.

[0059] 우선, 초기 계산은 [수학식 2] 내지 [수학식 4]를 이용하여 수행될 수 있다.

수학식 2

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - cu_0 - ku_0}{m}$$

[0060]

수학식 3

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} c + \frac{\gamma}{\beta\Delta t^2} m$$

[0061]

수학식 4

$$a = \frac{1}{\beta\Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c; \quad b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) c$$

[0062]

[0063] [수학식 2] 내지 [수학식 4]에서, $\hat{k}$는 유효강성계수, β, γ, a, b는 상수, Δt는 시간 간격이다.

[0064] 다음으로 [수학식 5] 내지 [수학식 9]를 계산하게 된다.

수학식 5

$$\Delta\hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i \left(\Delta\hat{p}_i = \Delta p_i + a\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t} + b\frac{u_i - 2u_{i-1} + u_{i-2}}{\Delta t^2}\right)$$

[0065]

수학식 6

$$\Delta u_i = \frac{\Delta\hat{p}_i}{\hat{k}} = \frac{\Delta p_i + a\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t} + b\frac{u_i - 2u_{i-1} + u_{i-2}}{\Delta t^2}}{\hat{k}}$$

[0066]

수학식 7

$$\Delta\dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{u}_i + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{u}_i$$

[0067]

수학식 8

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{u}_i$$

[0068]

수학식 9

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i = u_i + \frac{\Delta p_i + a\dfrac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t} + b\dfrac{u_i - 2u_{i-1} + u_{i-2}}{\Delta t^2}}{\hat{k}}$$

[0069]

[0070] 여기서, [수학식 5] 내지 [수학식 9]를 반복하여 다음 시간 단계에서의 응답을 반복적으로 계산하게 된다.

[0071] 상기한 뉴마크 베타 기법은 정확도가 높은 해를 안정적으로 산정할 수 있는 방법이기는 하지만, 많은 연산 시간이 필요하다는 단점이 있다.

[0072] 따라서, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)의 예측 모델링부(140)는 뉴마크 베타 기법을 그대로 사용하지 않고 이를 대체하기 위해 기계학습 또는 인공지능 모델 학습의 한 가지 알고리즘인 선형회귀법 알고리즘(Linear Regression Algorithm)을 사용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 예측 모델 또는 에뮬레이터(Emulator)를 생성할 수 있다.

[0073] 따라서, 상기 예측 모델링부(140)는 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터로 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시켜서 상기 입력 데이터와 상기 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 에뮬레이터를 생성할 수 있다.

[0074] 선형회귀 알고리즘은 입력 데이터와 출력 데이터 사이의 선형 상관관계를 모델링하는 방법인데, 예측 모델링부(140)에서 선형 상관관계를 모델링하기 위해서는 실측 데이터 관리부(130)에서 입력 데이터 및 출력 데이터를 정의하는 것이 선행되어야 한다.

[0075] 실측 데이터 관리부(130)는, 제1 계측부(121)에서 측정된 구조물 가속도 응답을 입력 데이터로 정의하고, 제2 계측부(123)에서 측정된 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의할 수 있다.

[0076] 또한, 실측 데이터 관리부(130)는, 이전 시간 단계(i, i-1, i-2)에서 측정된 제1 계측부(121) 및 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답과 상기 외부 하중을 입력 데이터로 정의하고, 다음 시간 단계(i+1)에서 측정된 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의할 수 있다.

[0077] 상기 예측 모델링부(140)는, 이전 시간 단계(i, i-1, i-2)에서 측정된 제1 계측부(121) 및 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답 $(u_i^{output}, u_{i-1}^{output}, u_{i-2}^{output})$ (u_i^{input}) 과 상기 외부 하중을 입력 데이터로 사용하고 다음 시간 단계(i+1)에서 측정된 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답 (u_{i+1}^{output}) 을 출력 데이터로 사용하되, 선형회귀 알고리즘을 이용하여 회귀모델을 추정할 수 있는데, 추정되는 회귀모델은 [수학식 10] 및 [수학식 11]로 표현될 수 있다.

수학식 10

$$u_{i+1} = \theta_0 + \theta_1 \cdot u_i + \theta_2 \cdot u_{i-1} + \theta_3 \cdot u_{i-2} + \theta_4 \cdot p_i$$

[0078]

수학식 11

$$u_{i+1} = u_i + \frac{\Delta p_i + a\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t} + b\frac{u_i - 2u_{i-1} + u_{i-2}}{\Delta t^2}}{\hat{k}}$$

[0079]

[0080] [수학식 10] 및 [수학식 11]에서 Θ_0, Θ_1, Θ_2, Θ_3, Θ_4는 회귀계수이다.

[0081] [수학식 11]과 같이 표현되는 회귀모델은 뉴마크 베타 기법의 [수학식 9]와 유사한 형태를 가지며, 회귀계수들은 뉴마크 베타 기법의 상수들(β, ɣ, a, b)에 대응될 수 있다.

[0082] 상기 예측 모델링부(140)는 [수학식 11]로 표현되는 회귀모델(예측모델 또는 에뮬레이터)을 추정할 수 있다. 상기 회귀모델(예측모델 또는 에뮬레이터)은 지진과 같은 외부 하중이 구조물에 가해진 경우 구조물의 응답을 예측하고 실제 구조물의 응답과 비교하여 구조물의 손상 발생여부를 판정하는 용도로 사용될 수 있다.

[0083] 한편, 예측 모델링부(140)는, 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터를 이용하여 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시키되, 선형회귀기법을 이용할 뿐만 아니라 기계학습 알고리즘 또는 딥러닝 알고리즘을 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 예측 모델 또는 에뮬레이터를 생성할 수 있다.

[0084] 예를 들어, 구조물(110)의 1층(118) 또는 기초층(116)에 설치된 제1 계측부(121)에서 측정된 구조물 가속도 응답 (u_i^{input}) 을 입력 데이터로 정의하고, 다른 층 즉, 제1 계측부(121)가 설치된 위치 보다 상부층에 설치된 제2 계측부(123)에서 측정된 구조물 가속도 응답 (u_{i+1}^{output}) 을 출력 데이터로 정의하는 경우, 예측 모델링부(140)에서 얻어지는 회귀모델(예측모델)은 [수학식 12]와 같다.

수학식 12

$$u_{i+1}^{output} = \theta_0 + \theta_1 \cdot u_i^{output} + \theta_2 \cdot u_{i-1}^{output} + \theta_3 \cdot u_{i-2}^{output} + \theta_4 \cdot u_i^{input}$$

[0085]

[0086] 이와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 자유장 가속도계측 센서에서 계측 가능한 외부하중(p)을 사용하지 않고, 1층 또는 기초층에 설치된 가속도 응답 (u_i^{input}) 과 다른 층에 설치된 가속도 응답 (u_{i+1}^{output}) 을 이용하는 것에 특징이 있다.

[0087] 지진 등 외부 하중이 구조물(110)에 가해지고 구조물(110)에 손상이 없을 경우 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물 가속도 응답을 데이터 베이스화 하여 실측 데이터 관리부(130)에 저장하고, 예측 모델링부(140)는 데이터 베이스화 된 구조물 가속도 응답을 이용하여 예측 모델 또는 인공지능 모델을 학습시키되 선형회귀기법을 이용하여 구조물 가속도 응답 사이의 선형 상관관계를 나타내는 회귀모델을 생성하게 된다.

[0088] 한편, 구조물 응답 예측부(150)는 구조물(110)에 새로운 외부 하중이 가해지는 경우에, 가속도 계측부(120)에서 측정된 가속도 응답 데이터 중 입력 데이터를 예측 모델링부(140)에 입력하여 상기 새로운 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답을 예측할 수 있다. 여기서, "새로운 외부 하중"은 예측 모델링부(140)에서 회귀모델 또는 예측모델을 생성하기 위해 사용된 외부 하중과 다른 새로운 하중 또는 현재 시간 단계에서 발생하는 외부 하중을 의미한다. 예를 들면, 구조물의 손상 여부를 판단하기 위해 필요한 구조물 가속도 응답을 예측하는 예측 모델 또는 회귀 모델이 예측 모델링부(140)에서 구축된 상태에서, 새로운 지진이 발생하는 경우 이 지진에 의한 하중이 "새로운 외부 하중"이다.

[0089] 만약, 지진 하중을 포함하는 외부 하중(F)에 의해 구조물(110)에 손상이 발생하는 경우에는, 구조물(110)이 선형 시스템에서 비선형 시스템으로 변하거나(구조물에 손상이 발생하면 구조물의 응답이 비선형성을 가짐), 회귀계수가 달라져서 기존과 다른 선형 시스템으로 변하게 된다.

[0090] 따라서, 예측 모델링부(140)에서 구축된 회귀모델 즉, 기존의 선형 시스템에서 추정된 회귀모델을 이용하여 구조물 응답 예측부(150)에서 얻은 외부 하중에 대한 구조물 가속도 응답 예측 값이 가속도 계측부(120)에서 얻은 가속도 응답 측정 값과 차이가 없거나 차이가 작으면 구조물에 손상이 발생하지 않은 것이고, 차이가 크면 구조물에 손상이 발생한 것이라고 판단할 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 구조물 손상 판단부(160)에서 구조물 손상 여부를 판단할 수 있다.

[0091] 구조물 손상 판단부(160)는 구조물 응답 예측부(150)에서 예측된 구조물 가속도 응답과 가속도 계측부(120)에서 측정된 가속도 응답을 비교하여 상기 선형 상관관계가 비선형 상관관계 또는 다른 선형 상관관계로 변한 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

[0092] 구조물 손상 판단부(160)는, 상기 이전 시간 단계(i, i-1, i-2)에서 측정된 제1 계측부(121) 및 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답이 예측 모델링부(140)에 입력되어 예측된 상기 다음 시간 단계(i+1)에서 제2 계측부(123)에서의 구조물 가속도 응답과, 상기 다음 시간 단계(i+1)에서 제2 계측부(123)에서 측정된 구조물 가속도 응답의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE; Normalized Mean Square Error)로부터 구조물의 손상 여부를 판단할 수 있다.

[0093] 도 3 내지 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)의 구조물 응답 예측 정확도를 검증하기 위한 수치해석 시뮬레이션 수행 결과를 보여준다.

[0095] * 수치해석 시뮬레이션

[0096] 수치해석 시뮬레이션을 위해 도 3에 도시된 바와 같은 2개의 자유도를 가지는 구조물을 모델링한다. 도 3에서 Node 2는 구조물(110)의 1층에 설치된 제1 계측부(121)를 모델링한 것이고, Node 1은 구조물(110)의 2층에 설치된 제2 계측부(123)를 모델링한 것이다.

[0097] Case 1: 임의의 지진1에 해당하는 외부 하중을 입력 하중으로 하는 지진 해석을 수행하여 구조물 가속도 응답을 산정한다.

[0098] Case 2: 임의의 지진2에 해당하는 외부 하중을 입력 하중으로 하는 지진해석을 수행하여 구조물 가속도 응답을 산정한다.

[0099] 도 4에서 (a)는 시간 단계에 따른 지진 외부 하중을 나타난 그래프이고, (b)는 지진 외부 하중에 대한 Node 1에서의 구조물 가속도 응답을 나타낸 그래프이며, (c)는 지진 외부 하중에 대한 Node 2에서의 구조물 가속도 응답을 나타낸 그래프이다. 도 4의 (a) 내지 (c)의 데이터를 이용하여 회귀모델 또는 예측모델을 구축하게 된다.

[0100] Case 1의 경우에 있어서, 이전 시간 단계(i, i-1, i-2)에서의 Node 2에서 측정된 1층 구조물 가속도 응답 $(u_i^{output}, u_{i-1}^{output}, u_{i-2}^{output})$ 과 Node 1에서 측정된 2층 구조물 가속도 응답 (u_i^{input})을 입력 데이터로 정의하고, 다음 시간 단계(i+1)에서의 Node 1에서 측정된 2층 구조물 가속도 응답 (u_{i+1}^{output})을 출력 데이터로 정의하고 선형회귀 알고리즘을 이용하고 학습시켜서 회귀모델(예측모델)을 구축할 수 있다. 구축된 회귀모델은 [수학식 12]와 같이 표현될 수 있다.

[0101] 여기서, 시간 단계는 제1 및 제2 계측부(121,123)에서 입력 하중에 대한 구조물의 가속도 응답을 계측하는 시간

간격(Δt)에 따른 시간을 의미한다. 시간 간격(Δt)은 임의로 결정될 수 있다.

[0102] 도 5의 (a)는 상기 Case 1의 경우에 있어서 구축된 회귀모델(예측모델)에서 예측된 구조물 가속도 응답을 보여주는 그래프이다.

[0103] Case 2의 경우에 있어서, 이전 시간 단계(i, i-1, i-2)에서의 Node 2에서 측정된 1층 구조물 가속도 응답 $(u_i^{output}, u_{i-1}^{output}, u_{i-2}^{output})$ 과 Node 1에서 측정된 2층 구조물 가속도 응답 (u_i^{input})을 상기 회귀모델(예측모델)에 입력하여 다음 시간 단계(i+1)에서의 Node 1의 2층 구조물 가속도 응답 (u_{i+1}^{output})을 예측한다. 여기서, 예측된 구조물 가속도 응답과, 제2 계측부(123)에서 계측된 구조물 가속도 응답을 비교하여 구조물 손상 여부를 판단하게 된다.

[0104] 도 5의 (b)는 상기 Case 2의 경우에 있어서 2층 구조물 가속도 응답의 예측값과 제2 계측부(123)에서의 측정값을 보여주는 그래프이다. 도 5의 (b)에서 실선(Calculation 참조)은 제2 계측부(123)에서 측정된 구조물 가속도 응답이고 점선(Prediction 참조)은 예측된 구조물 가속도 응답인데, 측정값(실선)과 예측값(점선)이 거의 일치함을 알 수 있다. 측정값과 예측값의 NMSE를 계산해 보면 0.97856이 나오는데, NMSE가 1에 가까울수록 정확한 예측을 할 수 있다.

[0105] 상기 수치해석 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 학습된 인공지능 모델을 이용하여 2 개의 새로운 지진 가속도를 입력하고 구조물의 응답을 예측한 결과, 2개의 경우 모두 99% 이상의 정확도를 보였다. 또한, 인공지능 모델을 학습시키는데 소요된 시간은 약 0.1초였고, 인공지능 모델이 구조물의 응답을 예측하는데 소요된 시간 0.01초 이하였다. 이와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 시스템(100)은 학습된 인공지능 모델을 이용하여 새로운 지진에 대한 구조물의 응답을 빠르고 정확하게 예측할 수 있다.

[0106] 한편, 구조물 손상 판단부(160)는, 임계값=1-특정 NMSE값이 되도록 임계값을 정의하고 NMSE값이 임계값을 초과하는 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다. 여기서, 임계값은 지진을 포함하는 외부 하중에 대한 계측 데이터가 많이 축적될수록 정확도가 높아질 수 있다.

[0107] 이하에서는 도 6을 참조하여 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 방법에 대해서 설명한다. 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 손상 감지 방법은 상기한 구조물 손상 감지 시스템(100)을 사용하여 구조물의 손상을 감지하는 방법이다.

[0108] 도 6을 참조하면, 본 발명은 상기한 구조물 손상 감지 시스템(100)을 사용한 구조물 손상 감지 방법에 있어서, 구조물(110)에 가속도 계측부(120)를 설치하는 단계(1100); 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물 가속도 응답을 얻는 단계(1200); 구조물 가속도 응답을 이용하여 인공지능 모델을 학습시키는 단계(1300); 인공지능 모델의 학습결과를 이용하여 예측 모델링부(140)를 생성하는 단계(1400); 예측 모델링부(140)를 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 단계(1500); 및 구조물(110)의 손상 여부를 판단하는 단계(1600);를 포함할 수 있다.

[0109] 여기서, 구조물의 손상 여부를 사용자/관리자에게 전송하는 단계(1700)를 더 포함할 수 있다. 구조물의 손상 여부를 사용자/관리자에게 전송하는 단계(1700)는 통신부(170)에 의해서 수행될 수 있다.

[0110] 가속도 계측부(120)에서 측정된 구조물 가속도 응답을 얻는 단계(1200)에서는, 구조물(110)의 1층(118) 또는 기초층(116)에 설치된 제1 계측부(121)와, 제1 계측부(121) 보다 상부층에 설치된 제2 계측부(123)에서 측정된 구조물 가속도 응답을 얻을 수 있다. 여기서, 제1 및 제2 계측부(121,123)에서 측정되는 구조물 가속도 응답은 지진을 포함하는 외부 하중이 구조물(110)에 가해져서 구조물(110)이 흔들릴 때 측정한 실측 가속도 데이터이다.

[0111] 상기 인공지능 모델을 학습시키는 단계(1300)는, 이전 시간 단계에서 측정된 제1 계측부(121) 및 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답을 입력 데이터로 정의하고 다음 시간 단계에서 측정된 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답을 출력 데이터로 정의하여 인공지능 모델을 학습시킬 수 있다.

[0112] 상기 인공지능 모델을 학습시키는 단계(1300)에서는, 실측 데이터 관리부(130)를 이용하여 제1 및 제2 계측부(121,123)에서 측정된 데이터를 분배할 수 있다. 예를 들면, 이전 시간 단계에서의 제1 계측부(121)의 구조물 가속도 응답 $(u_i^{output}, u_{i-1}^{output}, u_{i-2}^{output})$ 과 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답 (u_i^{input})을 입력 데이터

로 정의하고, 다음 시간 단계에서의 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답 (u_{i+1}^{output})을 출력 데이터로 정의할 수 있다. 여기서, 제1 계측부(121)는 구조물(110)의 기초층(116) 또는 1층(118)에 설치되고, 제2 계측부(123)는 제1 계측부(121) 보다 상부층에 설치된다.

[0113] 상기 예측 모델링부를 생성하는 단계(1400)에서는, 상기 입력 데이터 및 상기 출력 데이터를 이용하여 인공지능 모델을 학습시키되, 선형회귀기법을 이용할 뿐만 아니라 기계학습 알고리즘 또는 딥러닝 알고리즘을 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 예측 모델 또는 에뮬레이터를 생성할 수 있다.

[0114] 상기 예측 모델링부(140)를 이용하여 구조물 가속도 응답을 예측하는 단계(1500)에서는, 새로운 지진이 발생하는 등 새로운 외부 하중이 발생하는 경우에 구조물(110)의 실측 가속도 응답 데이터를 예측 모델링부(140)에 입력하여 구조물 가속도 응답을 예측할 수 있다.

[0115] 상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계(1600)는, 예측된 구조물 가속도 응답과 측정된 가속도 응답을 비교하여 예측 모델링부(140)에 입력되는 입력 데이터와 예측 모델링부(140)에서 출력되는 출력 데이터 사이의 선형 상관관계가 동일하게 유지되는지를 판단할 수 있다.

[0116] 또한, 상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계(1600)는, 이전 시간 단계에서 측정된 제1 계측부(121) 및 제2 계측부(123)의 구조물 가속도 응답이 예측 모델링부(140)에 입력되어 예측된 다음 시간 단계에서 제2 계측부(123)에서의 구조물 가속도 응답과, 다음 시간 단계에서 제2 계측부(123)에서 측정된 구조물 가속도 응답의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE)로부터 구조물의 손상 여부를 판단할 수 있다.

[0117] 상기 구조물의 손상 여부를 판단하는 단계(1600)에서는, 구조물 손상 판단부(160)가 임계값=1-특정 NMSE값이 되도록 임계값을 정의하고 NMSE값이 임계값을 초과하는 경우에 구조물에 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

[0118] 한편, 본 발명은 구조물 손상 감지 방법을 실행하기 위한 컴퓨터 판독이 가능한 프로그램이 기록된 컴퓨터 판독 가능 기록매체를 제공할 수 있다. 본 발명의 실시예들은 다양한 컴퓨터로 구현되는 동작을 수행하기 위한 프로그램 명령을 포함하는 컴퓨터 판독 가능 매체를 포함할 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 로컬 데이터 파일, 로컬 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체는 본 발명을 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, CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체, 플롭티컬 디스크와 같은 자기-광 매체, 및 롬, 램, 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함될 수 있다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함할 수 있다.

[0120] 이상과 같이 본 발명의 실시예에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 청구범위뿐 아니라 이 청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

[0121] 100: 구조물 손상 감지 시스템

110: 구조물

120: 가속도 계측부

121: 제1 계측부

123: 제2 계측부

130: 실측 데이터 관리부

140: 예측 모델링부

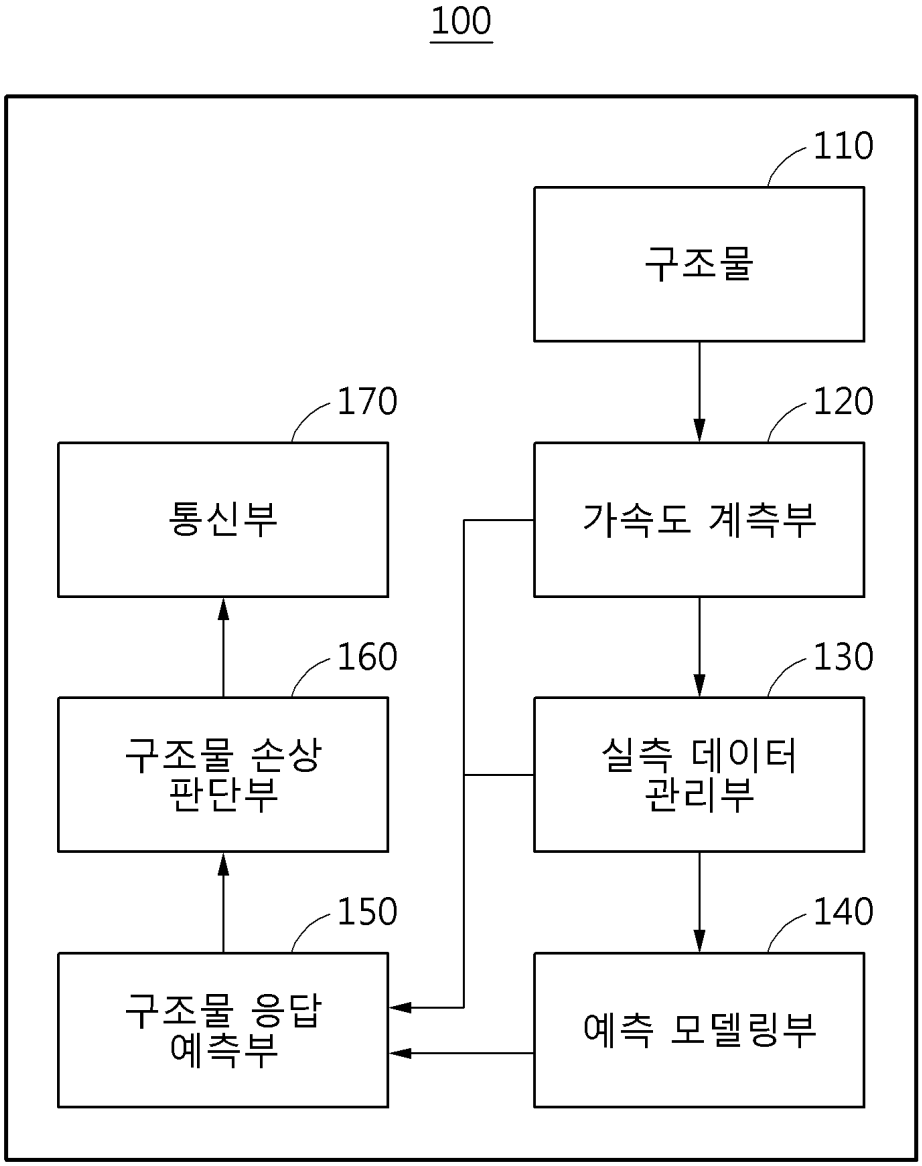
150: 구조물 응답 예측부

160: 구조물 손상 판단부

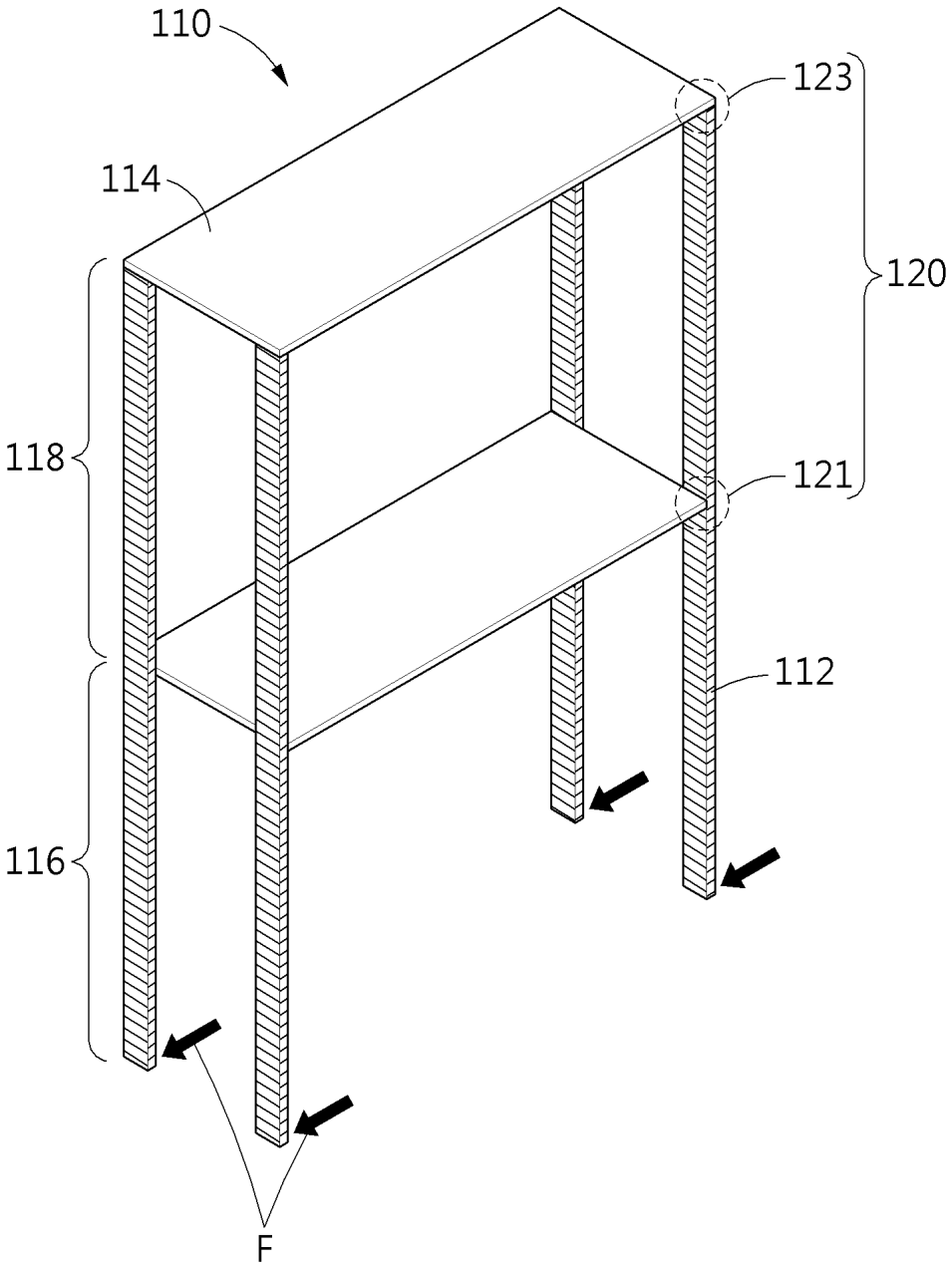
170: 통신부

도면

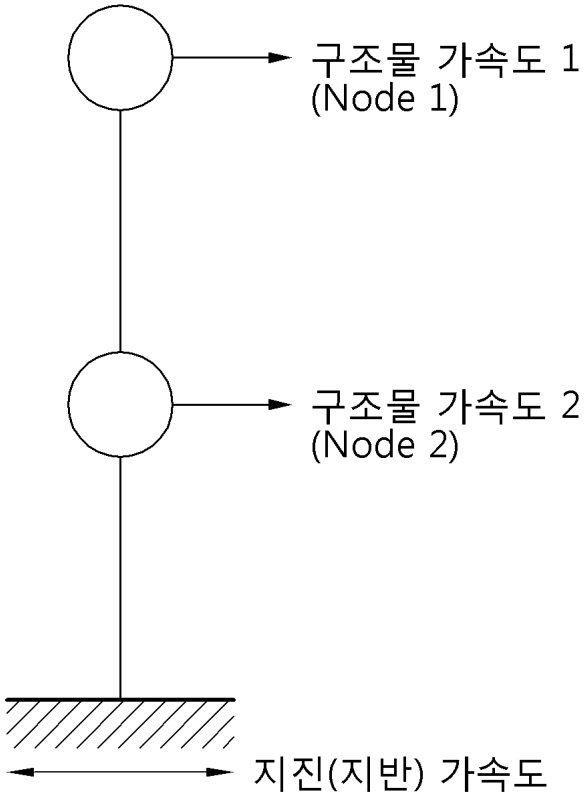
도면1



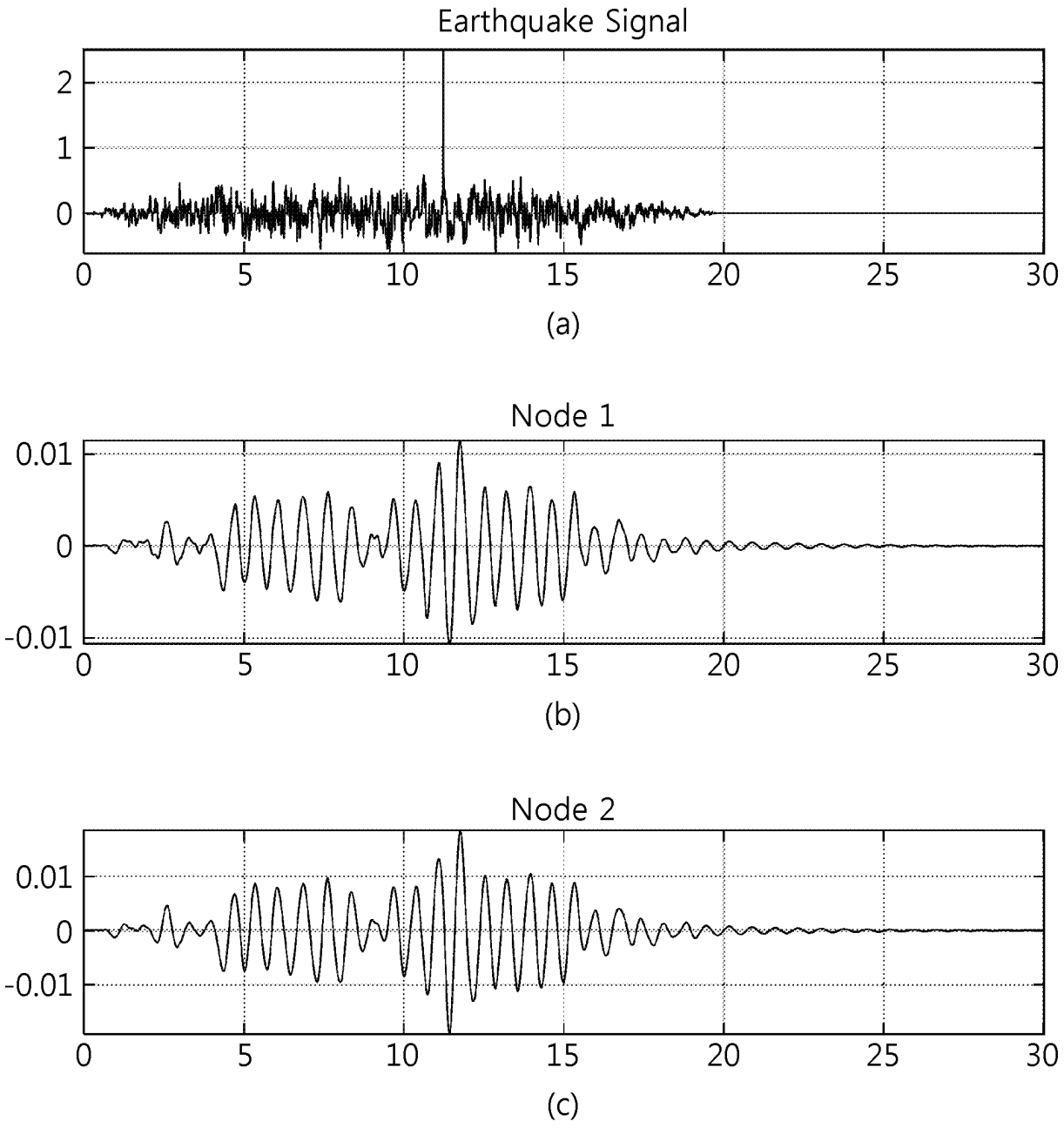
도면2



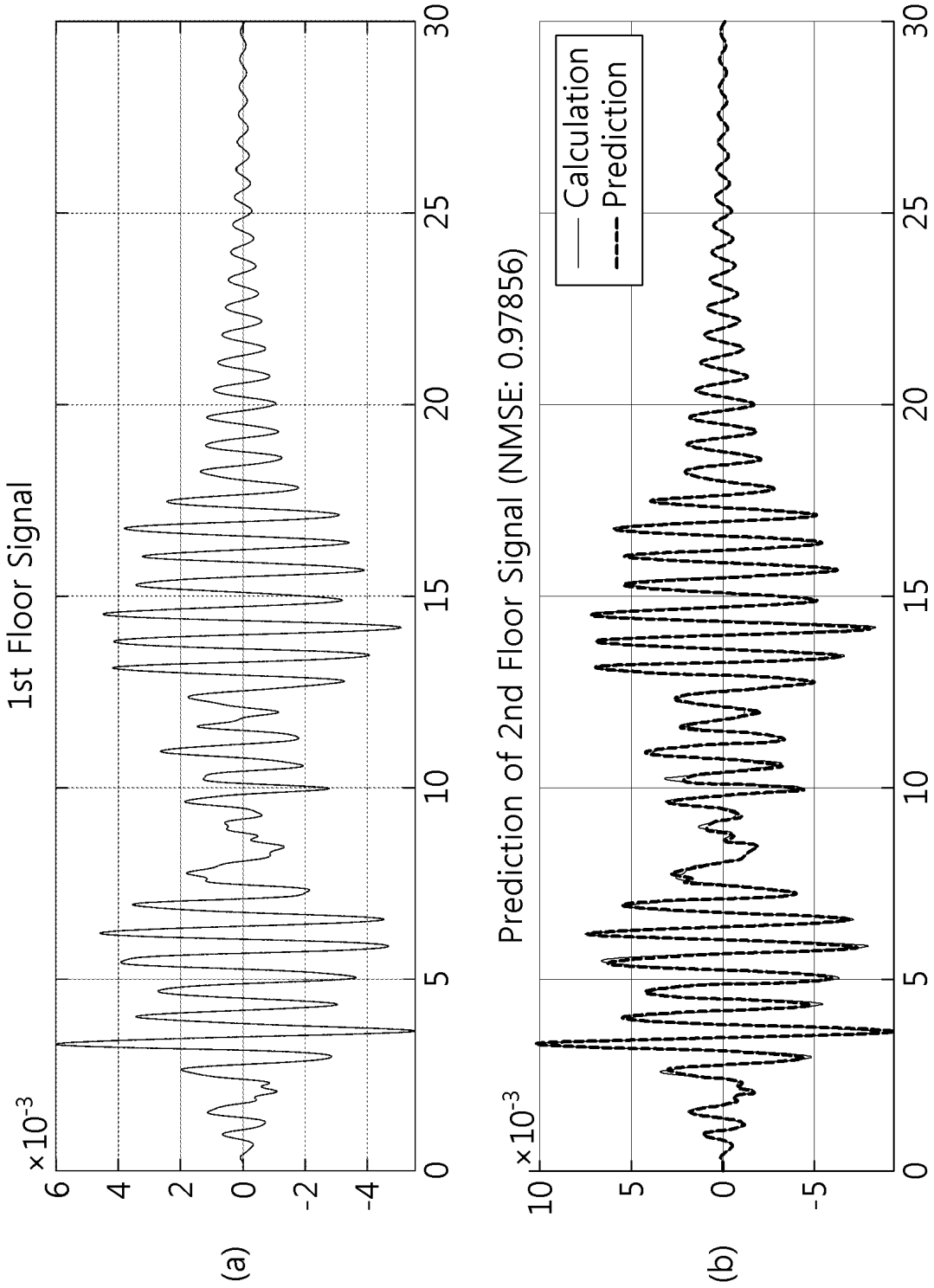
도면3



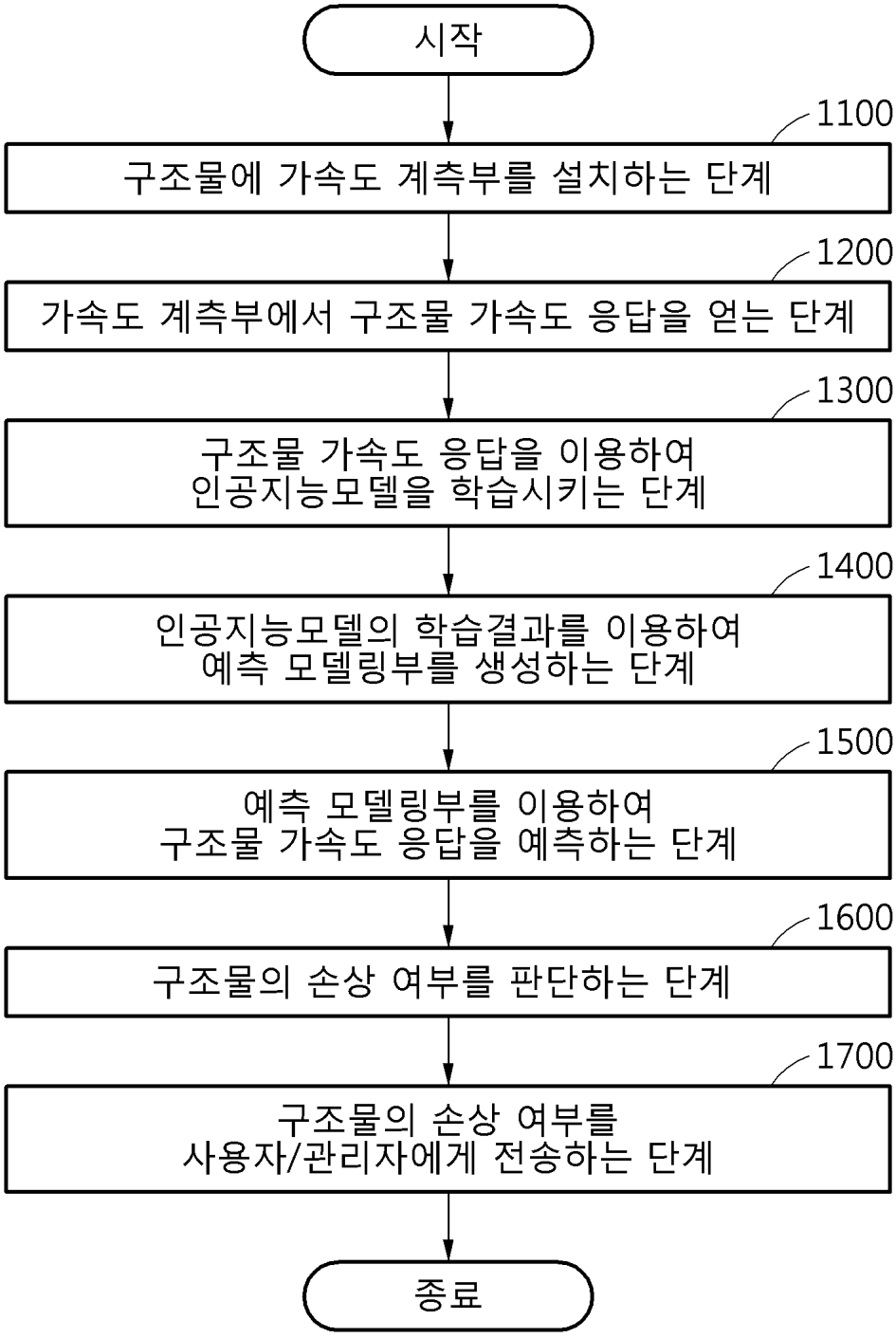
도면4


Earthquake Signal
2
1
0
0
5
10
15
20
25
30
(a)
Node 1
0.01
0
-0.01
0
5
10
15
20
25
30
(b)
Node 2
0.01
0
-0.01
0
5
10
15
20
25
30
(c)

도면5


1st Floor Signal
×10^-3
6
4
2
0
-2
-4
0
5
10
15
20
25
30
(a)
Prediction of 2nd Floor Signal (NMSE: 0.97856)
Calculation
Prediction
×10^-3
10
5
0
-5
0
5
10
15
20
25
30
(b)

도면6


시작
1100
구조물에 가속도 계측부를 설치하는 단계
1200
가속도 계측부에서 구조물 가속도 응답을 얻는 단계
1300
구조물 가속도 응답을 이용하여
인공지능모델을 학습시키는 단계
1400
인공지능모델의 학습결과를 이용하여
예측 모델링부를 생성하는 단계
1500
예측 모델링부를 이용하여
구조물 가속도 응답을 예측하는 단계
1600
구조물의 손상 여부를 판단하는 단계
1700
구조물의 손상 여부를
사용자/관리자에게 전송하는 단계
종료