



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0086970
(43) 공개일자 2018년08월01일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01N 3/26 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01N 3/26 (2013.01)

G01N 2203/0216 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2017-0011087

(22) 출원일자 2017년01월24일

심사청구일자 2017년01월24일

(71) 출원인

세종대학교산학협력단

서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)

(72) 발명자

이중재

서울특별시 광진구 능동로 209, 충무관 710호 (군자동)

김세훈

서울특별시 광진구 능동로 209, 충무관 710A호 (군자동)

(74) 대리인

유병욱, 한승범

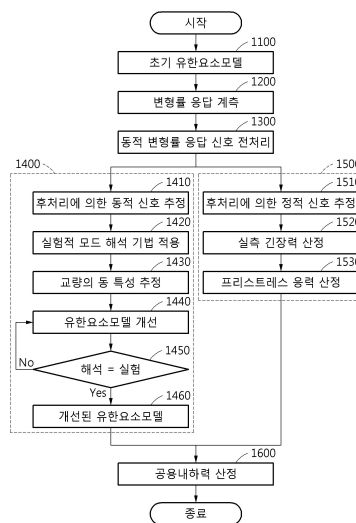
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은, 내하력 평가의 대상이 되는 PSC 교량에 대한 초기 유한요소모델을 도출하는 단계; 상기 PSC 교량의 강연선에 매립되어 있는 선형센서를 사용하여 교량의 동적 변형률 응답을 계측하는 단계; 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계; 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계; 및 상기 동적신호 및 상기 정적신호를 이용하여 상기 PSC 교량의 공용 내하력을 산정하는 단계;를 포함할 수 있다.

대표도 - 도6



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 16RDRP-B076564-03

부처명 국토교통부

연구관리전문기관 국토교통과학기술진흥원

연구사업명 국토교통기술지역특성화사업

연구과제명 GNSS 및 접촉식 센서를 활용한 중소형 교량 모니터링 기술개발

기 여 율 1/1

주관기관 세종대학교 산학협력단

연구기간 2016.06.27 ~ 2020.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

내하력 평가의 대상이 되는 PSC 교량에 대한 초기 유한요소모델을 도출하는 단계;
 상기 PSC 교량의 강연선에 매립되어 있는 선형센서를 사용하여 교량의 동적 변형률 응답을 계측하는 단계;
 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계;
 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계; 및
 상기 동적신호 및 상기 정적신호를 이용하여 상기 PSC 교량의 공용 내하력을 산정하는 단계;
 를 포함하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계는,
 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 동적신호를 추정하는 단계;
 추정된 상기 동적신호를 실험적 모드해석 기법에 적용하는 단계;
 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계;
 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계; 및
 상기 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,
 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 동적신호를 추정하는 단계는,
 상기 동적 변형률 응답에 대역통과필터를 적용하여 상기 동적 변형률 응답에 포함된 통행차량의 진동수 성분을 제거하여 상기 동적신호를 얻는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,
 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계는,
 상기 선형센서로부터 상기 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 계측하고 실험적 모드해석 기법을 사용하여 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하거나, 상기 선형센서와 별도로 상기 PSC 교량에 마련된 가속도 센서로부터 가속도 응답을 계측하고 실험적 모드해석 기법을 사용하여 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계는,

상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이가 최소화되도록 최적화 알고리즘을 이용하여 수행되는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하는 단계는,

개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하여 고정하중 및 활하중에 의한 응력을 산정하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 7

제2항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계는,

상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 정적신호를 추정하는 단계;

후처리에 의해 추정된 상기 정적신호를 이용하여 상기 강연선의 긴장력을 산정하는 단계; 및

상기 강연선의 긴장력으로부터 프리스트레스 응력을 산정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 정적신호를 추정하는 단계는,

상기 동적 변형률 응답에 고대역통과필터를 적용하여 상기 동적 변형률 응답에 포함된 상기 PSC 교량의 고유진동수 성분 및 통행차량의 진동수 성분을 제거하여 상기 정적신호를 얻는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 9

제5항에 있어서,

최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계는,

상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이를 최소화하기 위해 유한요소모델로부터 산정된 변형률 모드형상과 실험으로부터 추정된 변형률 모드형상의 적합도를 평가하는 기준이 포함된 목적함수를 이용하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 초기 유한요소모델에 대하여 구조천이해석을 수행하여 상기 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 산정하고, 이로부터 상기 변형률 모드 형상을 추정하는 것을 특징으로 하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가

방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 선형센서 매립형 강연선의 실측 긴장력 값과 교량의 동특성을 기반으로 하여 개선된 유한요소모델을 이용하여 신뢰도 높은 PSC 교량의 내하력을 평가하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 도 1에 도시된 바와 같이, 일반적인 교량은 거더(girder, 10) 및 거더(10)에 의해서 지지되는 슬래브(20)를 포함하는 상부구조와, 교대(30), 교각(40) 및 기초슬래브(45)를 포함하는 하부구조로 이루어진다. 거더(10) 등은 주로 콘크리트로 형성된다.

[0003] 그런데, 콘크리트는 압축응력에는 강하지만 인장응력에는 약하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 인장력에 강한 철근을 넣은 것을 철근 콘크리트(RC; Reinforced Concrete)라고 한다. 하지만, 콘크리트 자체의 자중이 너무 무거워 RC 구조로는 시간장이 긴 교량에 적용하기에는 무리가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 기술이 프리스트레스 콘크리트(PSC; PreStressed concrete)이다.

[0004] 프리스트레스 콘크리트는 "미리 응력을 준 콘크리트"라는 의미라고 할 수 있다.

[0005] 도 2에는 교량의 거더(10) 내부에 강연선(50)이 마련되어 있는 프리스트레스 콘크리트 거더가 도시되어 있다. 도 2에 도시된 바와 같이 거더(10)를 형성하는 콘크리트 속에 강연선(50)을 넣고 강력하게 잡아당겨서 양단을 정착구(60)에 고정시키면, 강연선(50)에 걸리는 압축력 때문에 콘크리트에 압축응력이 작용하게 되고 거더(10)를 형성하는 콘크리트는 휨응력에 강한 콘크리트가 된다.

[0006] 프리스트레스 콘크리트(이하에서는 "PSC"라 함)의 종류에는, 미리 강연선을 인장하고 콘크리트를 타설하는 프리텐션 방법과, 굳은 콘크리트에 강연선을 넣어 인장하는 포스트 텐션 방법이 있습니다.

[0007] 한편, 도 3에 도시된 바와 같이, 복수개의 선재가 꼬여 있는 구성을 가지는 강연선의 긴장력(강연선이 가지는 저항력)을 측정하기 위해서 광섬유 센서와 같이 변형률을 측정할 수 있는 선형센서를 이용하는 기술이 제안된 바 있다.

[0008] 텐던(tendon)이라고도 불리는 강연선(50)은 단면의 중심에 위치하는 심선(51)과, 그 주변에 복수개로 배치되는 측선(52)이 꼬여 있는 형태를 가지는데, 강연선(50)이 가지는 저항력 즉, 강연선(50)의 긴장력을 측정하기 위해서 광섬유 센서(예를 들면, Fiber Bragg Grating 센서)와 같이 변형률을 측정할 수 있는 선형센서(53)를 심선(51)에 매립하고, 심선(51)의 주위에 측선(52)을 배치한 후 측선을 꼬아서 선형센서(53)가 단면의 중심에 배치된 선형센서 매립형 강연선이 제안되어 있다.

[0009] 한편, 교량과 같은 사회기반시설물은 공용 중 안전성이 최우선으로 고려되어야 하는 구조물이므로 정확하고 정밀한 설계, 시공과 함께 안전하고 편리한 건전성 확보를 위해 지속적인 유지관리가 반드시 필요하다.

[0010] 일반적으로 교량은 시공 후 시간의 경과에 따라서 여러 가지 하중 및 환경적 요인들로 인해서 손상 및 열화가 진행된다. 따라서, 교량의 건전도 및 안전상태를 진단하기 위해서 교량 내하력 산정이 실시되는데, 교량의 내하력을 산정하기 위해 수행되는 종래의 재하실험은 많은 문제점을 가지고 있다. 현재 수행되고 있는 재하실험은 교량에 설치된 센서를 통해 교량의 변형률과 처짐과 같은 단순한 응답들을 획득하여 실시되는데, 이러한 응답들을 이용하여 교량의 모든 거동을 표현하기에는 한계가 있다.

[0011] 또한, 강연선이 매립된 PSC 교량의 경우에는 내하력을 산정하기 위해서 강연선의 긴장력의 예측값을 사용하기 때문에 신뢰도가 높은 결과를 얻기 어렵다. 뿐만 아니라, 강연선이 매립된 PSC 교량의 동특성은 고려하지 않고 강연선의 긴장력만 예측한 값을 사용하여 내하력을 산정하기 때문에 정확한 결과를 얻을 수 없다.

[0012] 따라서, PSC 교량의 내하력을 보다 정확하게 산정하거나 평가할 수 있는 기술 또는 방법에 대한 요구가 늘어나고 있는 실정이다.

[0013] 본 출원인은, 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명을 제안하게 되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0014] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 제10-1526927호(2015.06.09.)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0015] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 제안된 것으로, 선형센서 매립형 강연선의 실측 긴장력 값과 교량의 동특성을 기반으로 하여 개선된 유한요소모델을 이용하여 신뢰도 높은 PSC 교량의 내하력을 평가하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법을 제공한다.
- [0016] 본 발명은 강연선으로부터 측정된 상시진동기반 변형률 응답을 활용하여 PSC 교량의 유한요소모델을 개선할 수 있는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법을 제공한다.
- [0017] 본 발명은 강연선으로부터 측정된 데이터를 활용하여 개선된 유한요소모델을 사용하는 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

- [0018] 상기한 바와 같은 과제를 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은, 내하력 평가의 대상이 되는 PSC 교량에 대한 초기 유한요소모델을 도출하는 단계; 상기 PSC 교량의 강연선에 매립되어 있는 선형센서를 사용하여 교량의 동적 변형률 응답을 측정하는 단계; 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계; 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계; 및 상기 동적신호 및 상기 정적신호를 이용하여 상기 PSC 교량의 공용 내하력을 산정하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0019] 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계는, 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 동적신호를 추정하는 단계; 추정된 상기 동적신호를 실험적 모드해석 기법에 적용하는 단계; 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계; 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계; 및 상기 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0020] 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 동적신호를 추정하는 단계는, 상기 동적 변형률 응답에 대역통과 필터를 적용하여 상기 동적 변형률 응답에 포함된 통행차량의 진동수 성분을 제거하여 상기 동적신호를 얻을 수 있다.
- [0021] 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계는, 상기 선형센서로부터 상기 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 측정하고 실험적 모드해석 기법을 사용하여 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하거나, 상기 선형센서와 별도로 상기 PSC 교량에 마련된 가속도 센서로부터 가속도 응답을 측정하고 실험적 모드해석 기법을 사용하여 상기 PSC 교량의 동특성을 추정할 수 있다.
- [0022] 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계는, 상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이가 최소화되도록 최적화 알고리즘을 이용하여 수행될 수 있다.
- [0023] 상기 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하는 단계는, 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하여 고정하중 및 활하중에 의한 응력을 산정할 수 있다.
- [0024] 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계는, 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 정적신호를 추정하는 단계; 후처리에 의해 추정된 상기 정적신호를 이용하여 상기 강연선의 긴장력을 산정하는 단계; 및 상기 강연선의 긴장력으로부터 프리스트레스 응력을 산정하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0025] 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 정적신호를 추정하는 단계는, 상기 동적 변형률 응답에 고대역통과 필터를 적용하여 상기 동적 변형률 응답에 포함된 상기 PSC 교량의 고유진동수 성분 및 통행차량의 진동수 성

분을 제거하여 상기 정적신호를 얻을 수 있다.

[0026] 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계는, 상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이를 최소화하기 위해 유한요소모델로부터 산정된 변형률 모드 형상과 실험으로부터 추정된 변형률 모드형상의 적합도를 평가하는 기준이 포함된 목적함수를 이용할 수 있다.

[0027] 상기 초기 유한요소모델에 대하여 구조전이해석을 수행하여 상기 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 산정하고, 이로부터 상기 변형률 모드 형상을 추정할 수 있다.

발명의 효과

[0028] 본 발명에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은 강연선의 긴장력을 실제 측정한 값을 이용함으로써 신뢰도가 높은 프리스트레스 응력을 산정할 수 있다.

[0029] 본 발명에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은 실제 교량의 응답을 잘 모사하는 개선된 유한요소모델을 사용하기 때문에 신뢰도 높은 구조해석이 가능하다.

[0030] 본 발명에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은 강연선에 매립되어 있는 선형센서를 이용하여 때문에 별도의 센서를 설치할 필요 없이 내하력을 산정하거나 평가할 수 있다.

[0031] 본 발명에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은 상시진동 측정이 가능하고 측정한 변형률로부터 동특성 추정 및 개선된 유한요소모델을 구축할 수 있다.

[0032] 본 발명에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은 강연선의 실측 긴장력 도입과 개선된 유한요소모델을 모두 적용함으로써 보다 신뢰도가 높은 내하력을 산정하거나 평가할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 일반적인 거더 교량의 구조를 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 강연선이 매립된 PSC 교량의 거더를 보여주는 도면이다.

도 3은 종래기술에 따른 PSC 교량의 거더에 마련된 선형센서 매립형 강연선을 보여주는 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템을 개략적으로 보여주는 도면이다.

도 5는 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템을 개략적으로 보여주는 도면이다.

도 6은 및 도 7은 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법을 설명하기 위한 순서도이다.

도 8은 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법에 의해 추정된 동적 변형률 응답 신호, 정적 신호 및 동적 신호를 보여주는 데이터이다.

도 9는 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법을 사용하여 변형률 응답과 가속도 응답으로 추정된 양단 힌지 보 구조물의 1차 휨 모드를 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 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.

[0035] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템을 개략적으로 보여주는 도면, 도 5는 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템을 개략적으로 보여주는 도면, 도 6은 및 도 7은 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법을 설명하기 위한 순서도, 도 8은 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법에 의해 추정된 동적 변형률 응답 신호, 정적 신호 및 동적 신호를 보여주는 데이터, 도 9는 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법을 사용하여 변형률 응답과 가속도 응답으로 추정된 양단 힌지 보 구조물의 1차 휨 모드를 설명하기 위한 도면이다.

[0036] 본 발명에 따른 프리스트레스 콘크리트(이하, "PSC"라 함) 교량의 내하력 평가 방법은, PSC 교량 뿐만 아니라 프리스트레스 강연선이 구비되어 있는 모든 구조물에 적용될 수 있음을 밝혀 둔다.

[0037] 도 4를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템(100)은, PSC 교량의 거더(110)에

매립되어 있는 강연선(120)을 이용하여 교량의 동적 변형률 응답을 예측할 수 있다.

- [0038] 여기서, 강연선(120)은 선형센서(123)가 가운데 부분에 매립 내지 형성되어 있는 심선(121) 및 심선(121)을 둘러싸며 꼬인 형태로 제공되는 측선(122)을 포함하여 구성되는 일종의 스마트 텐던(smart tendon)이다. 즉, 강연선(120)은 단면의 중심에 위치하는 심선(121)과, 그 주변에 꼬여 있는 형태를 가지도록 복수개로 배치되는 측선(122)을 포함할 수 있다. 강연선(120)이 가지는 저항력 즉, 강연선(120)의 긴장력을 측정하기 위해서 광섬유 센서(예를 들면, Fiber Bragg Grating 센서)와 같이 변형률을 측정할 수 있는 선형센서(123)를 심선(121)에 매립하고, 심선(121)의 주위에 측선(122)을 배치한 후 측선을 꼬아서 선형센서(123)가 단면의 중심에 배치되는 형태이다.
- [0039] 본 발명의 일 실시예에 따른 내하력 평가 시스템(100)은 강연선(120)의 일단(정확하게는 선형센서(123)의 일단)을 인터로게이터(190)에 연결하여 강연선(120)의 동적 변형률 응답을 예측할 수 있다. 인터로게이터(190)를 이용하여 강연선(120)의 긴장력을 예측하고 교량의 동특성을 추정할 수 있다.
- [0040] 도 4에 도시된 본 발명의 일 실시예에 따른 내하력 평가 시스템(100)은 별도의 센서를 사용하지 않고 강연선(120)에 매립되어 있는 선형센서(123)를 사용한다. 이 때, 강연선(120)의 동적 변형률 응답을 예측하는 지점 즉, 변형률 응답 예측점(130)은 강연선(120)의 부분 중에서 거더(110)의 가장 하면에 가까운 부분이다. 다만, 변형률 응답 예측점(130)이 반드시 이에 한정되는 것은 아니며, 내하력 평가 또는 산정의 목적 또는 정밀도 등에 따라서 다소 변형될 수도 있다.
- [0041] 선형센서(123)로는 광센서를 이용할 수 있으며, FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 사용하는 것이 바람직하다. 선형센서(123)는 강연선(120)과 마찬가지로 강연선(120)의 길이방향으로 따라 길게 연장됨으로써 변형률을 예측할 수 있다.
- [0042] 본 발명의 일 실시예에 따른 내하력 평가 시스템(100)은 강연선(120)의 선형센서(123)에 연결된 인터로게이터(190)가 획득한 센싱 정보를 분석하여 강연선(120)의 긴장력을 예측할 수 있을 뿐만 아니라, PSC 교량의 동적 변형률 응답을 예측하고 동적 변형률 응답에 실험적 모드해석 기법을 적용함으로써 교량의 동특성을 추정할 수 있다.
- [0043] 도 5에는 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템(100')이 개략적으로 도시되어 있다. 도 4에 도시된 내하력 평가 시스템(100)과 비교하면, 거더(110)의 하면에 가속도센서(140)가 추가적으로 더 마련된 점에 차이가 있고 나머지 부분은 동일하다. 동일한 부분에 대한 설명은 생략한다.
- [0044] 도 5를 참조하면, 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템(100')은 거더(110)의 하면에 가속도센서(140)가 부착되고 가속도센서(140)를 인터로게이터(190)에 연결하여 가속도센서(140)에서 얻어진 계측값으로부터 PSC 교량의 동특성을 추정할 수 있다. 여기서, 인터로게이터(190)에 강연선(120)의 선형센서(123)와 가속도센서(140)가 모두 연결된다. 가속도센서(140)는 FBG 센서와 같이 광센서가 사용되는 것이 바람직하다.
- [0045] 인터로게이터(190)가 가속도센서(140)로부터 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 예측하고 동적 변형률 응답에 실험적 모드해석 기법을 적용함으로써 교량의 동특성을 추정할 수 있다.
- [0046] 이와 같이, 도 5에 도시된 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 시스템(100')은 선형센서 매립형 강연선(120)의 동적 변형률 응답과 가속도센서(140)의 가속도 응답을 하나의 인터로게이터(190)로 예측하여 강연선(120)의 긴장력 산출 및 PSC 교량의 동특성 추정을 수행할 수 있다.
- [0047] 이하에서는 도 4 및 도 5에 도시된 PSC 교량의 내하력 평가 시스템을 사용하여 내하력을 평가하는 방법에 대해서 설명한다.
- [0048] 도 6을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은, 내하력 평가의 대상이 되는 PSC 교량에 대한 초기 유한요소모델을 도출하는 단계(1100); 상기 PSC 교량의 강연선(120)에 매립되어 있는 선형센서(123)를 사용하여 교량의 동적 변형률 응답을 예측하는 단계(1200); 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계(1400); 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계(1500); 및 상기 동적신호 및 상기 정적신호를 이용하여 상기 PSC 교량의 공용 내하력을 산정하는 단계(1600);를 포함할 수 있다.
- [0049] 이와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 프리스트레스 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법은, 계측을 통하여 수집된 교량의 동적 변형률 응답을 후처리를 통하여 정적신호와 동적신호로 분류하고, 후처리를 통해 추정된 정적

신호와 동적신호를 이용하여 유한요소모델을 개선하고, 강연선의 실측 긴장력 및 프리스트레스 응력을 산정하여 PSC 교량의 공용내하력을 산정할 수 있다.

- [0050] 상기 초기 유한요소모델을 도출하는 단계(1100)는, 상기 PSC 교량의 설계 정보를 이용하여 초기 유한요소모델(FEM; Finite Element Model)을 도출할 수 있다. 유한요소모델은 유한요소해석(Finite element analysis)을 수행하기 위한 모델으로써, 초기의 유한요소모델은 내하력을 평가 또는 산정하고자 하는 PSC 교량의 설계 정보, 예를 들면 PSC 교량의 설계 스펙 등으로부터 도출될 수 있다.
- [0051] 상기 초기 유한요소모델을 도출하는 단계(1100)에서 도출된 유한요소모델은 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계(1400)에서 선형센서(123)가 매립된 강연선(120)으로부터 측정된 데이터를 활용하여 개선되는 과정을 거치게 된다. 이에 대해서는 후술하도록 한다.
- [0052] 상기 PSC 교량의 강연선(120)에 매립되어 있는 선형센서(123)를 사용하여 교량의 동적 변형률 응답을 측정하는 단계(1200)는, 도 4 및 도 5에 도시되어 있는 내하력 평가 시스템(100, 100')의 강연선(120) 및 인터로게이터(190)를 사용하여 교량의 동적 변형률 응답을 측정하게 된다. 교량의 거더(110)에 매립된 강연선(120)의 선형센서(123)를 이용하기 때문에 교량의 상시진동기반의 동적 변형률 응답을 측정할 수 있다.
- [0053] 이와 같이 측정된 교량의 동적 변형률 응답 신호는 전처리 과정을 거치게 된다(1300).
- [0054] 측정을 통하여 수집된 교량의 동적 변형률 응답(1200)은 후처리를 통하여 정적신호 및 동적신호로 추정되거나 분류되는데, 정적신호는 교량의 하중 또는 매우 느린 속도로 운행하는 차량 등에 의해서 교량에 가해지는 내부하중으로 인해 강연선(120)의 긴장력에 의해 발생하는 변형률이라고 할 수 있다.
- [0055] 반면에, 동적신호는 교량의 떨림, 진동이나 출렁거림 또는 빠른 속도로 운행하는 차량 등에 의해서 교량에 가해지는 외부하중에 대한 변형률이라고 할 수 있다.
- [0056] 본 발명의 일 실시예에 따른 내하력 평가 방법에서는 측정된 동적 변형률 응답을 후처리하여 동적신호와 정적신호로 분류한 후, 동적신호를 이용해서는 교량의 동특성을 추정하고 개선된 유한요소모델을 얻고, 정적신호를 이용해서는 강연선의 실측 긴장력을 산정하게 된다. 여기서, 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계(1400)와 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계(1500)는 서로 시간적 선후 관계에 있는 것이 아니라 시간적으로 대응한 관계에 있다고 할 수 있다.
- [0057] 도 8을 참조하면, 측정된 동적 변형률의 시간영역에서의 응답 데이터(도 8의 (a) 참조), 동적 변형률 응답에서 후처리로 추정된 정적신호의 시간영역에서의 데이터(도 8의 (b) 참조), 그리고 동적 변형률 응답에서 후처리로 추정된 동적신호의 시간영역에서의 데이터(도 8의 (c) 참조)가 도시되어 있다.
- [0058] 우선, 상기 동적 변형률 응답에서 동적신호를 분류하는 단계(1400)는, 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 동적신호를 추정하는 단계(1410); 추정된 상기 동적신호를 실험적 모드해석 기법에 적용하는 단계(1420); 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계(1430); 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440); 및 상기 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하는 단계(1460);를 포함할 수 있다.
- [0059] 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 동적신호를 추정하는 단계(1410)는, 상기 동적 변형률 응답에 대역통과필터(Band Pass Filter)를 적용하여 상기 동적 변형률 응답에 포함된 통행차량의 진동수 성분을 제거하여 상기 동적신호를 얻을 수 있다. 교량의 동특성을 추정하기 위해서 필요한 동적신호에는 교량의 떨림 또는 출렁거림과 관련된 신호만 포함되어야 하고 교량의 통행하는 차량에 따른 신호는 노이즈이기 때문에 제거해야 한다. 이를 위해서, 동적 변형률 응답의 원시 데이터(raw data)가 대역통과필터를 통과하게 하여 통행차량의 진동수 성분을 제거하여 필요한 동적신호만을 추정할 수 있다.
- [0060] 추정된 상기 동적신호를 실험적 모드해석 기법에 적용하는 단계(1420)에서는 후처리를 통하여 추정된 동적신호를 실험적 모드해석 기법에 사용하여 교량의 동특성을 추정할 수 있도록 한다.
- [0061] 여기서, 실험적 모드해석 기법으로는 주파수영역 분해법(Frequency Domain Decomposition; FDD) 또는 추계론적 부공간 규명법(Stochastic Subspace Identification; SSI)이 이용될 수 있고, 실험적 모드해석 기법을 통한 상시진동 가속도의 해석으로 교량의 해석모드(교량의 고유주파수 및 모드 형상)를 추출할 수 있다. 추출한 교량의 해석모드를 기반으로 하여 최적화 기법을 이용한 해석 모델의 개선을 수행하게 된다.
- [0062] 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계(1430)는, 상기 선형센서

(123)로부터 상기 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 계측하고 실험적 모드해석 기법을 사용하여 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하거나(도 4에 도시된 내하력 평가 시스템의 경우), 상기 선형센서와 별도로 상기 PSC 교량에 마련된 가속도 센서로부터 가속도 응답을 계측하고 실험적 모드해석 기법을 사용하여 상기 PSC 교량의 동특성을 추정할 수 있다(도 5에 도시된 내하력 평가 시스템의 경우).

[0063] 상기 실험적 모드해석 기법의 적용에 의해 상기 PSC 교량의 동특성을 추정하는 단계(1430)에서는 초기 유한요소 모델의 개선에 필요한 동특성을 선정할 수 있다.

[0064] 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)는, 상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이가 최소화되도록(도 6의 1450 참조) 최적화 알고리즘을 이용하여 수행될 수 있다. 즉, 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)에서는 동적신호로부터 추정된 동특성을 이용하여 유한요소모델을 개선할 수 있다.

[0065] 도 6을 참조하면, 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)에서는, 상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이가 같거나 거의 차이가 없을 정도 그 차이가 최소화되었다고 보는 경우에는 개선된 유한요소모델(1460)을 도출하고, 그 차이가 최소화되었다고 볼 수 없는 경우에는 유한요소모델 개선을 다시 수행하게 된다(1440).

[0066] 이와 같이, 유한요소모델의 개선을 통하여 실제 교량의 휨 성능과 하중 횡분배 성능을 모사하기 위해서는 각 성능과 관련된 동특성의 추정이 필요하다. 교량의 휨 성능은 교량의 교축방향 휨 모드와 관계가 있으며, 교량의 횡분배 하중 성능은 비틀림 모드와 교축 직각방향 휨 모드와 관계가 있다. 따라서 실제 교량의 거동을 잘 모사할 수 있는 개선된 유한요소모델 구축을 위해서는 1차 교축 방향 휨 모드, 1차 비틀림 모드, 그리고 1차 교축 직각방향 휨 모드 등 최소 3가지 이상 교량의 동특성 추정이 필요하다.

[0067] 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)에서 사용되는 최적화 알고리즘으로는 다운힐 심플렉스 방법(Downhill simplex method) 또는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm) 등의 추계론적인 방법을 사용하는 것이 바람직하다.

[0068] 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)를 통해서 개선된 유한요소모델은 실제 PSC 교량의 동적응답 및 정적응답을 잘 모사하게 된다.

[0069] 한편, 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)는, 상기 동적신호로부터 추정된 상기 PSC 교량의 동특성과 상기 유한요소모델의 해석 결과의 차이를 최소화하기 위해 유한요소모델로부터 산정된 변형률 모드형상과 실험으로부터 추정된 변형률 모드형상의 적합도를 평가하는 기준이 포함된 목적함수를 이용할 수 있다.

[0070] 선정된 유한요소모델 개선 변수를 유전자 알고리즘 즉, 최적화 알고리즘에 도입하여 목적함수의 최적화를 수행하게 되는데, 해석모델(즉, 유한요소모델)과 실측값의 차이를 최소화하기 위하여 사용되는 목적함수는 다음 [수학식 1]과 같다.

수학식 1

$$f = \alpha \sum_{i=1}^N w_i \left(\frac{f_i^{FEM} - f_i^{Exp}}{f_i^{Exp}} \right) + \beta \sum_{i=1}^N w_i (1 - MAC(\phi_i^{Exp} - \phi_i^{FEM}))^2$$

[0071]

[0072] [수학식 1]에서 α , β 는 물리량별 가중치로서, $0 \leq \alpha, \beta \leq 1, \alpha + \beta = 1$ 이다.

[0073] w_i 는 i 번째 모드의 가중치로써, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 이다.

[0074] f_i^{FEM} , ϕ_i^{FEM} , f_i^{Exp} , ϕ_i^{Exp} 는 각각 유한요소모델로부터 계산된 i 번째 모드의 고유진동수, 모드형상, 실험으로부터

터 구한 i 번째 고유진동수, 모드형상이다.

- [0075] 또한, [수학식 1]에서 MAC는 Modal Assurance Criterion로써, 유한요소모델로부터 산정된 변형률 모드형상과 실험으로부터 추정된 변형률 모드형상의 적합도를 평가하는 기준이다.
- [0076] 한편, 변형률 응답과 가속도 응답으로 추정된 양단 힌지 보 구조물(예를 들면, 교량의 거더)의 1차 휨 모멘트의 해석 결과를 보여주는 도 9를 참조하면, (a)는 양단 힌지 보 구조물 즉, 교량의 거더의 해석 모델을 보여주는 도면인데, 구조물을 폭 및 높이가 1m인 다수개의 정육면체로 분할하며, 1~10의 숫자는 노드를 의미한다. (b)는 변형률 응답으로 추정된 모드형상의 1차 휨 모드이고 (b)는 가속도 응답으로 추정된 모드형상의 1차 휨 모드이다.
- [0077] 도 9에 도시된 바와 같이, 변형률 응답을 이용하여 추정하는 경우에, 교량의 고유진동수는 가속도 응답을 이용할 때와 동일하지만, 모드형상은 상이하다. 따라서, 초기 유한요소모델에 대하여 구조전이해석(structural transient analysis)을 수행하여 동적 변형률 응답을 산정하고, 이로부터 변형률 모드형상을 추정하는 것이 바람직하다.
- [0078] 즉, 변형률 모드형상 추정 절차를 보여주는 도 7에 도시된 바와 같이, 최적화 알고리즘을 이용하여 상기 유한요소모델을 개선하는 단계(1440)에서는, 상기 초기 유한요소모델에 대하여(2100) 구조전이해석을 수행하여(2200) 상기 PSC 교량의 동적 변형률 응답을 산정하고(2300), 이로부터 상기 변형률 모드형상을 추정할 수 있다(2400).
- [0079] 상기 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하는 단계(1460)는, 개선된 유한요소모델을 이용하여 상기 PSC 교량의 구조해석을 수행하여 고정하중 및 활하중에 의한 응력을 산정할 수 있다. 즉, PSC 교량의 거동을 잘 모사하는 개선된 유한요소모델을 이용하여 구조해석을 수행하여 계산된 구조물(예를 들면, PSC 교량의 거더)의 사하중에 의한 응력, 활하중에 의한 응력을 계산할 수 있다.
- [0080] 한편, 도 6을 참조하면, 상기 동적 변형률 응답에서 정적신호를 분류하는 단계(1500)는, 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 정적신호를 추정하는 단계(1510); 후처리에 의해 추정된 상기 정적신호를 이용하여 상기 강연선의 긴장력을 산정하는 단계(1520); 및 상기 강연선의 긴장력으로부터 프리스트레스 응력을 산정하는 단계(1530);를 포함할 수 있다.
- [0081] 상기 동적 변형률 응답의 후처리를 통해 상기 정적신호를 추정하는 단계(1510)는, 상기 동적 변형률 응답에 고대역통과필터(High Pass Filter)를 적용하여 상기 동적 변형률 응답에 포함된 상기 PSC 교량의 고유진동수 성분 및 통행차량의 진동수 성분을 제거하여 상기 정적신호를 얻을 수 있다. 즉, 교량의 동적 변형률 응답의 원시 데이터(raw data)가 고대역통과필터를 통과하도록 함으로써 동적 변형률 응답의 원시 데이터에 포함된 교량의 고유진동수 성분과 통행차량의 진동수를 제거하고 필요한 정적신호를 얻을 수 있다.
- [0082] 후처리에 의해 추정된 상기 정적신호를 이용하여 상기 강연선의 긴장력을 산정하는 단계(1520)에서는 강연선의 실측 긴장력을 산정할 수 있다. 상기 강연선의 긴장력으로부터 프리스트레스 응력을 산정하는 단계(1530)에서는 긴장력으로부터 프리스트레스 응력을 산정할 수 있다.
- [0083] 상기 PSC 교량의 공용 내하력을 산정하는 단계(1600)에서는, 개선된 유한요소모델을 이용하여 허용응력법으로 공용내하력을 산정할 수 있다. 이 때, 강연선의 실측 긴장력 도입과 개선된 유한요소모델을 모두 적용하여 공용내하력을 산정하게 된다.
- [0084] 상기 PSC 교량의 공용 내하력을 산정하는 단계(1600)에서는 아래의 수학식에 의해서 PSC 교량의 내하력을 산정하게 된다. 즉, PSC 교량의 내하력은 허용응력법을 적용하여 [수학식 2]에 의해서 산정될 수 있다.

수학식 2

$$\text{내하력} = R.F \times K_{\delta} (\text{또는 } K_{\epsilon}) \times DB$$

[0085]

[0086] [수학식 2]에서 R.F는 내하율, K_{δ} 는 변위 응답 보정계수, K_{ϵ} 는 변위 응답 보정계수, DB는 설계 활하중이다.

[0087] 내하율(R.F)은 [수학식 3]에 의해서 얻을 수 있다.

수학식 3

$$\text{내하율(R.F)} = \frac{\sigma_a - \sigma_d - \sigma_{ps}}{\sigma_l(1+i)}$$

[0088]

[0089] [수학식 3]에서 σ_a 는 허용응력, σ_d 는 고정하중에 의한 응력, σ_{ps} 는 프리스트레스 응력, σ_l 은 활하중에 의한 응력, i 는 충격계수이다.

[0090] 내하율 산정시, σ_{ps} 는 예측된 강연선의 긴장력으로부터(도 6의 1520 참조) 산출된 계산 값을 사용한다(하기 [수학식 4] 참조).

수학식 4

$$\sigma_{ps} = \frac{F_p}{A_p}$$

[0091]

[0092] [수학식 4]에서 F_p 는 예측된 강연선의 긴장력, A_p 는 강연선의 단면적이다.

[0093] 내하율 산정시, σ_d 와 σ_l 은 교량의 동특성을 기반으로 하여 개선된 유한요소모델의 구조해석 값을 사용한다.

[0094] 상기에서 설명한 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법은, 초기 유한요소모델을 현장실험으로부터 추정된 동특성을 사용하여 개선하고, 개선된 유한요소모델을 이용하여 허용응력법으로 공용내하력을 산정한다. 이 때, σ_{ps} 에 강연선(즉, 선형센서가 매립된 강연선)으로 예측된 긴장력으로부터 프리스트레스 응력 값을 산정하고 수학식에 대입한다.

[0095] 본 발명에 따른 PSC 교량의 내하력 평가 방법은 강연선에 선형센서가 매설되어 있기 때문에 센서를 설치하는 작업이 필요 없고, 선형센서가 매설된 스마트 강연선으로 상시진동 측정이 가능하며 예측된 교량의 동적 변형률로부터 동특성 추정 및 개선된 유한요소모델 구축이 가능할 뿐만 아니라 스마트 강연선으로 측정한 실제 PC 강연선의 긴장력 산정이 가능하고, 실제 교량의 거동을 잘 모사하는 개선된 유한요소모델과 실제 긴장력을 활용하여 신뢰도 높은 내하력의 평가가 가능하다.

[0097] 이상과 같이 본 발명의 일 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 청구범위뿐만 아니라 이 청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

[0098]

100, 100': PSC 교량의 내하력 평가 시스템

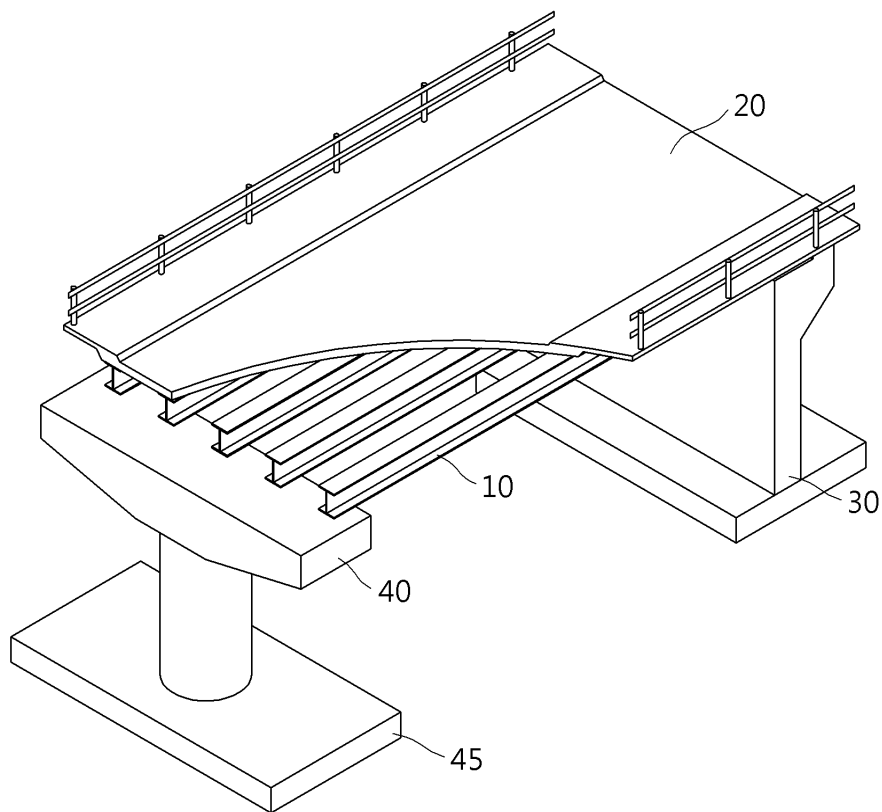
110: 거더

120: 강연선

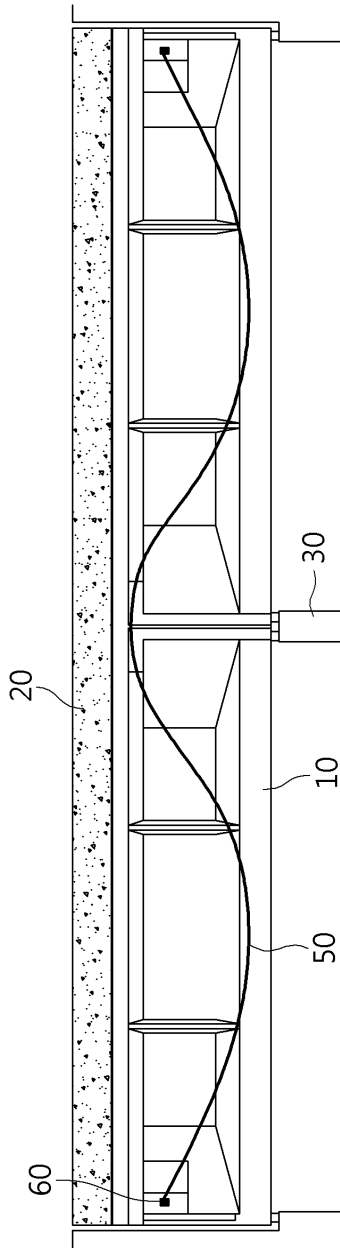
- 121: 심선
- 122: 측선
- 123: 선형센서
- 130: 변형률 응답 계측점
- 140: 가속도 센서
- 190: 인터로게이터

도면

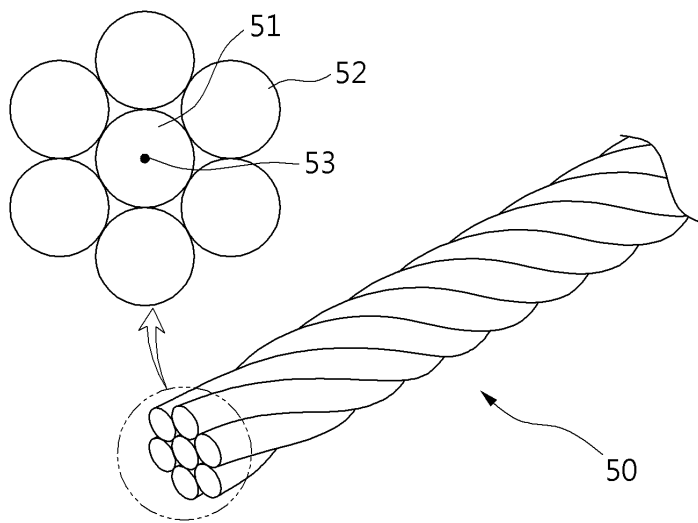
도면1



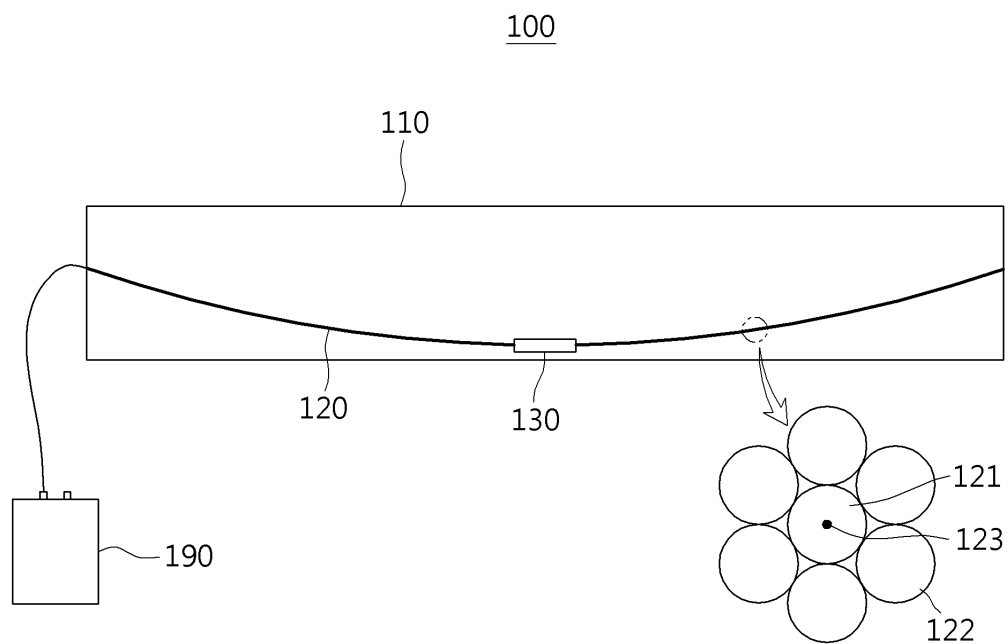
도면2



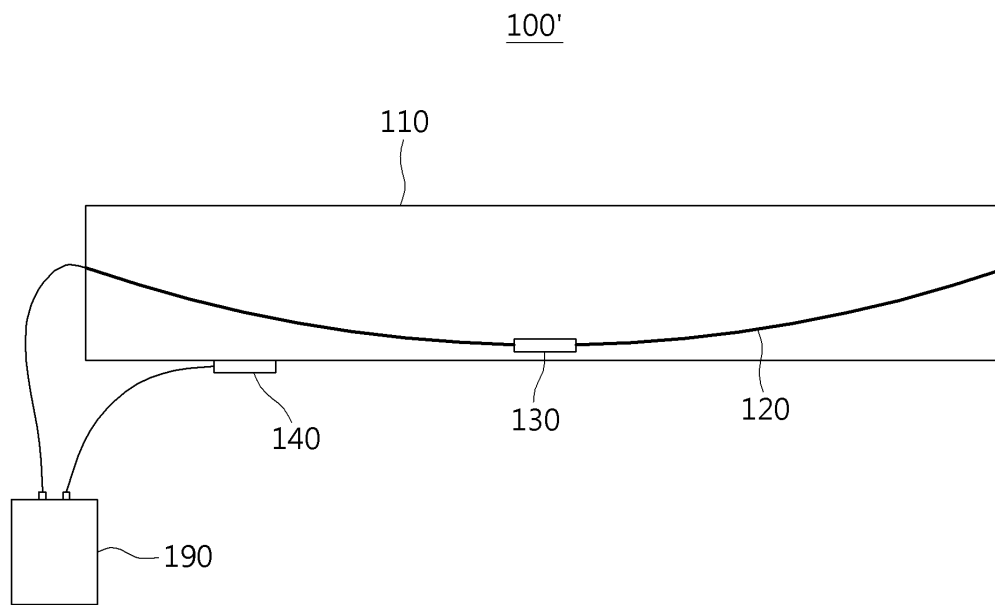
도면3



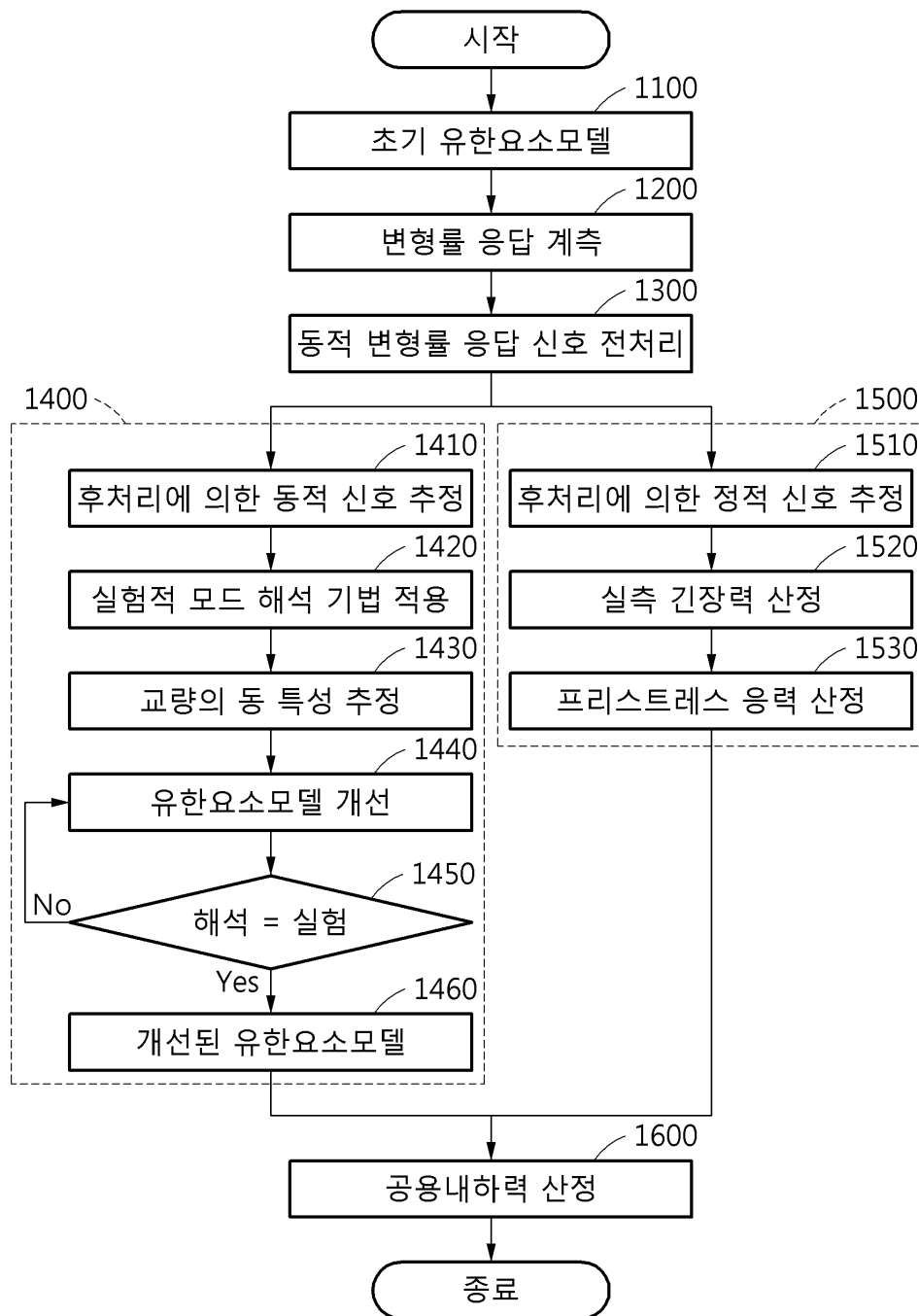
도면4



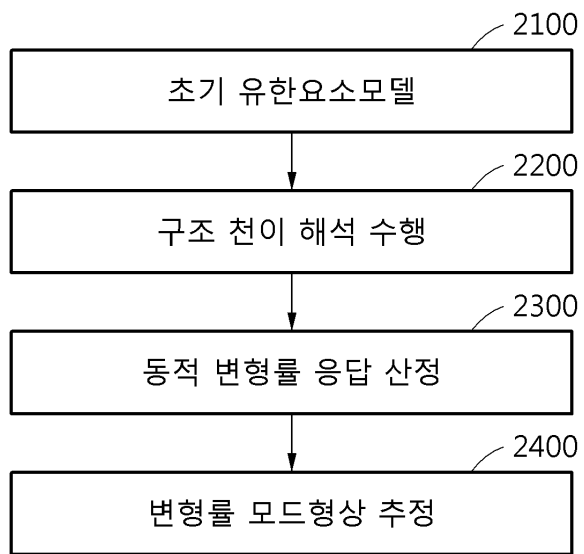
도면5



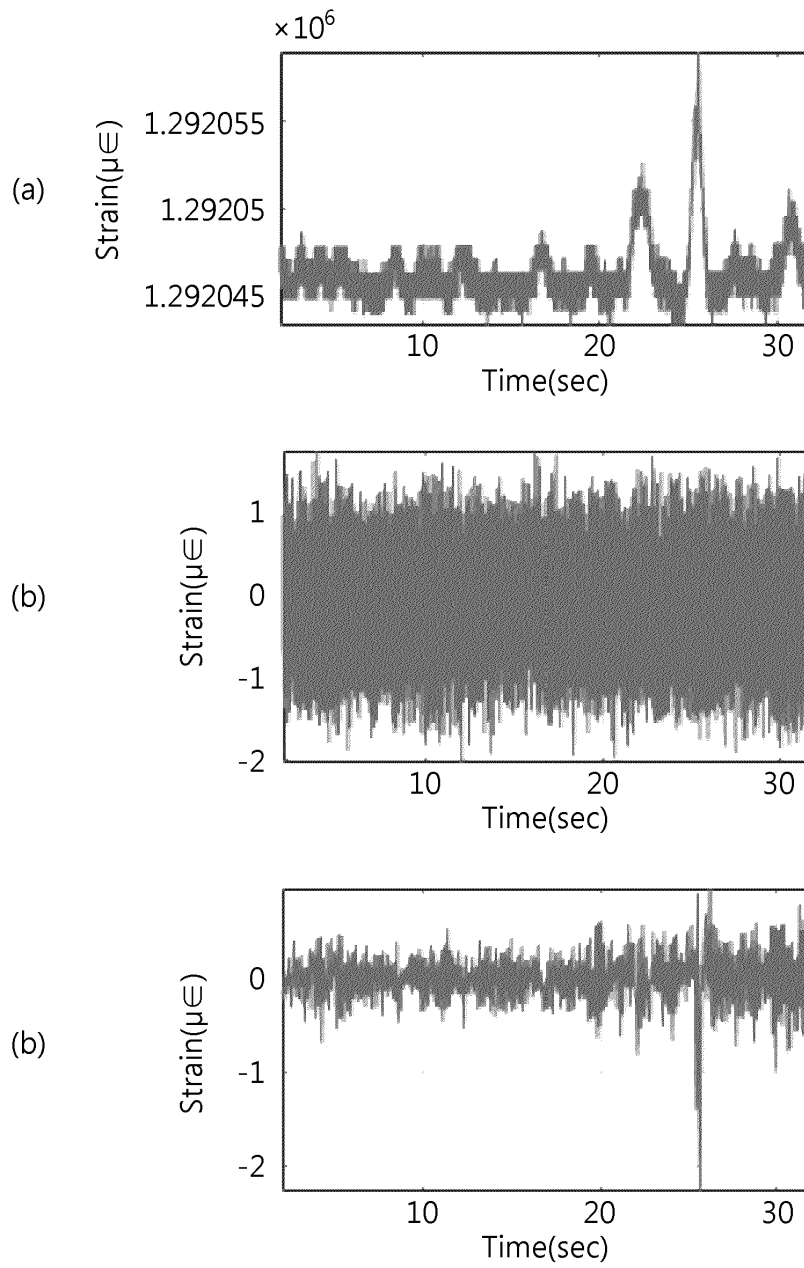
도면6



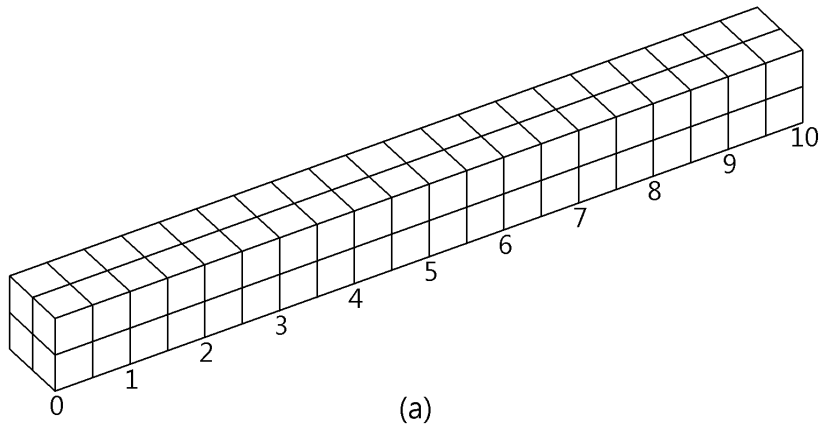
도면7



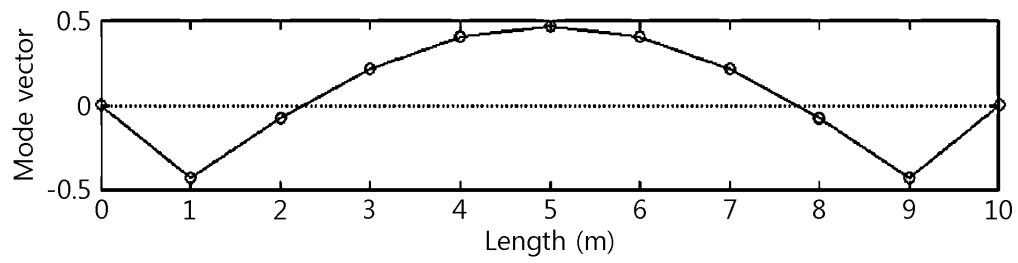
도면8



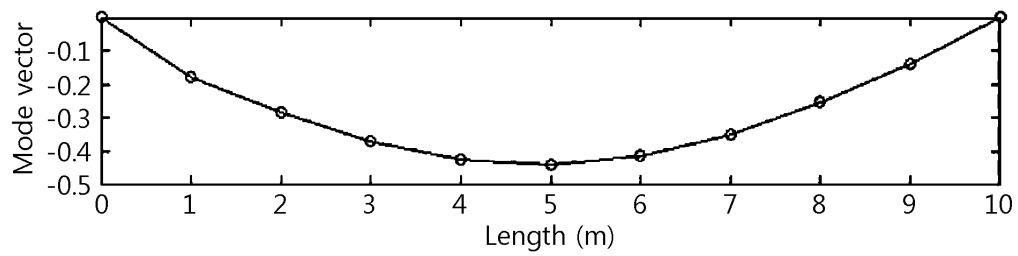
도면9



(a)



(b)



(c)