



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2008-0021300  
(43) 공개일자 2008년03월07일

(51) Int. Cl.

G01B 11/24 (2006.01) G01B 11/30 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2006-0084548

(22) 출원일자 2006년09월04일

심사청구일자 2006년09월04일

(71) 출원인

연세대학교 산학협력단

서울 서대문구 신촌동 134 연세대학교

(72) 발명자

박효선

서울 강남구 대치동 대치우성아파트 2동 302호

이임평

경기 안양시 만안구 안양5동 389-3 영복빌딩 5층

이흥민

전북 임실군 오수면 오수리 544-3번지

(74) 대리인

특허법인 원전

전체 청구항 수 : 총 4 항

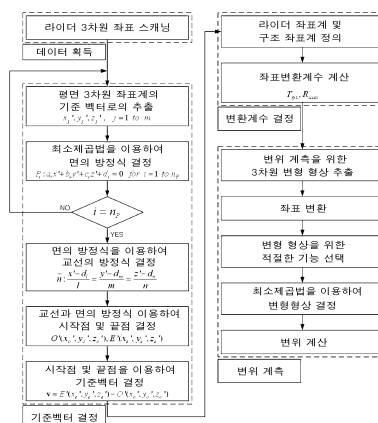
(54) 라이다를 이용한 구조물 건전성 진단방법

### (57) 요약

본 발명은 라이더(LIDAR)로 구조물의 3차원 형상정보를 실시간 검출하여 그 정보를 바탕으로 구조물의 건전성을 신속정확하게 평가할 수 있는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치와 이를 이용한 진단방법에 관한 것으로서 특히 라이다를 이용하여 구조물의 변위를 계측할 수 있는 변위계측모델이 제시된다. 제시된 변위계측모델은 라이다를 이용한 획득한 형상 정보를 사용하여 최소제곱법을 적용한 기준 벡터 생성, 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의 및 좌표 변환, 그리고 구조물 좌표계에서의 변형 계산의 단계로 구성되어 있다.

라이다에 의한 변위계측모델은 특정한 점의 이동량은 물론 변형된 구조물의 형상을 표현하는 점들의 3차원 좌표를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 발명에 따르면, 구조물 전체에 대한 건전성을 저렴한 비용으로 매우 신속하고 정밀하게 진단할 수 있고 구조물의 손상여부는 물론 손상위치와 손상정도 등을 정확한 계측이 가능하여 피로파괴나 예측하지 못한 재해 등으로 인한 구조물 사고를 미연에 방지할 수 있다.

대표도 - 도4



## 특허청구의 범위

### 청구항 1

빛을 투사하여 그 빛이 구조물 표면에 반사되어 되돌아오는데 걸린 시간으로 거리를 측정하여 구조물의 3차원 형상 정보를 실시간 검출하는 라이더(LIDAR)와; 상기 라이더로부터 실시간 입력되는 구조물의 시간대별 형상 정보를 이용하여 구조물의 정적 거동과 동적 거동을 검출하는 거동분석장치;를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치에 있어서

상기 거동분석장치는 i) 라이더를 이용하여 획득한 형상 정보를 사용하여 최소제곱법을 적용한 기준 벡터 생성, ii) 기준 벡터를 이용한 라이더 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의 및 좌표 변환 계수결정, 그리고 iii) 구조물 좌표계에서의 변형 계산 단계로 이루어진 구조물의 변위를 예측할 수 있는 변위예측모델을 사용하는 것을 특징으로 하는 구조물 건전성 진단장치.

### 청구항 2

구조물에 대한 시계가 확보되는 지점에 설치된 라이더를 이용하여 구조물의 3 차원 형상정보를 일정한 시간주기로 검출하는 형상정보추출단계; 상기 라이더로부터 주기적으로 입력되는 형상정보를 거동분석장치로써 분석하여 구조물의 정적 거동과 동적 거동을 산출하는 거동분석단계; 그리고, 상기 거동분석장치를 이용하여 상기 거동분석단계에서 산출된 정적 거동 및 동적 거동 정보를 해석하여 구조물의 건전성을 평가하여 그 결과를 출력하는 건전성평가단계;를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법에 있어서,

상기 거동분석단계는 i) 라이더를 이용하여 획득한 형상 정보를 사용하여 최소제곱법을 적용한 기준 벡터 생성, ii) 기준 벡터를 이용한 라이더 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의 및 좌표 변환 계수결정, 그리고 iii) 구조물 좌표계에서의 변형 계산 단계로 이루어진 구조물의 변위를 예측할 수 있는 변위예측모델을 사용하는 것을 특징으로 하는 구조물 건전성 진단방법.

### 청구항 3

제2항에 있어서,

상기 형상정보추출단계와 상기 거동분석단계 사이에 상기 라이더로부터 입력되는 형상정보를 이용하여 구조물을 모델링하는 구조물모델링단계가 더 추가되고;

상기 거동분석단계는 상기 구조물모델링단계에서 모델링된 구조물의 변위와 변형량을 분석하여 구조물의 역학적 변화를 해석하도록 이루어진 것을 특징으로 하는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법.

### 청구항 4

제2항 또는 제3항에 있어서,

상기 건전성평가단계는 거동 정보 해석결과가 사전 지정된 구조물의 사용성과 안전성 범위를 벗어나면 경보신호를 출력하도록 구성되어, 구조물의 건전성을 상시 진단할 수 있게 이루어진 것을 특징으로 하는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법.

## 명 세 서

### 발명의 상세한 설명

#### 발명의 목적

#### 발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 고층 건물이나 교량 등과 같은 대형 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 구조물 건전성 진단장치 및 그 진단장치를 이용한 진단방법에 관한 것으로, 특히, 라이더가 실시간 검출하는 구조물에 대한 3 차원 형상 정보를 이용하여 구조물의 건전성을 신속 정확하게 평가할 수 있는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치 및 그 진단장치를 이용한 진단방법에 관한 것이다.

<12>

- <13> 고층 건물이나 교량 등과 같은 구조물의 경우 시공 후 기간이 경과하면서 피로가 누적되고 재해 등으로 인해 역학적 성능이 저하되어 위험요소가 내재될 수 있기 때문에 사고 예방을 위해서 일정한 기간 주기로 건전성을 진단하게 된다. 구조물의 건전성 평가방법으로는 겉으로 나타나는 구조물의 거동 즉 정적변위와 동적변위를 측정하는 다음 그 결과를 가지고 구조물 내 각 부위별 응력을 해석하여 구조물의 손상여부, 손상위치, 손상정도 등을 파악할 수 있는 구조물의 거동 측정을 이용한 건전성 진단방식이 비교적 신속하고 정확한 진단결과를 얻을 수 있다는 장점으로 인해 널리 이용되고 있다. 이에, 구조물 건전성 진단을 위하여 구조물의 거동을 계측할 수 있는 장비들과 방법들이 개발되어 이용되고 있다.
- <14> 그러나, 구조물의 건전성 진단을 위해 사용되고 있는 구조물 거동 측정장비들과 그 장비를 이용한 구조물 건전성 진단방법들은 구조물 전체에 대한 거동측정이 불가능하거나 또는 거동량이 미세한 경우 계측의 정밀도가 현저히 떨어지기 때문에 구조물의 건전성을 정밀하게 진단하지 못하는 등의 문제점이 있었다.
- <15> 예컨대 구조물 정적 변위를 계측할 수 있는 변위계나 구조물의 동적변위를 측정할 수 있는 가속도계 등의 거동 측정장비를 이용한 구조물의 건전성 진단방법은 구조물 건전성 진단에 가장 일반적으로 사용되고 있는데, 변위계를 이용하는 경우에는 구조물에 대하여 국부적으로 계측한 정보에 의존하여 구조물 전체의 건전성을 진단하기 때문에 구조물 전체에 대한 건전성을 정밀하게 평가할 수 없다는 문제점이 있었으며, 또한 고층건물이나 장대교량의 경우와 같이 변위 범위가 수 미터에 이르거나 건물이 높고 육지로부터 멀리 떨어진 경우에는 진단이 불가능하다는 단점이 있었다. 그리고, 가속도계를 이용하는 경우에는 가속도를 측정하는 다음 두 번의 적분을 통해 구조물의 거동을 산출하는 어려움이 있고, 높은 주파수의 구조물의 거동은 비교적 정확하게 측정할 수 있지만 고층건물이나 장대교량과 같이 주파수가 낮고 변위가 큰 구조물에 대해서는 거동 측정의 정확도가 크게 떨어지기 때문에 적합하지 않다는 문제점이 있었다. 한편, 일반적인 구조물의 경우 크레인이나 케이블카 등의 장비를 이용하여 구조물에 직접 접근하여 균열이나 부식 등의 손상정도를 직접 육안으로 관찰하는 방법으로 구조물의 건전성을 진단할 수 있으나, 이와 같은 방법은 대상 구조물이 고층 건물, 장대교량과 같은 대형 구조물인 경우에는 많은 장비와 인력을 필요로 하기 때문에 경비가 많이 소요되고 관찰 작업 시 안전사고의 위험이 있었다. 또한, 내하력 평가를 위하여 하중재하시험을 실시하여 변위를 측정하는 방법도 사용하고 있지만, 고층건물이나 장대교량과 같은 대형구조물인 경우에는 이것 역시 거의 불가능하였다. 그 외에도, 구조물에 가속도계를 설치하여 구조물의 가속도를 측정하는 다음 그 결과를 가지고 주파수와 모드의 형태를 구하여 구조물의 손상위치와 손상정도를 찾아내는 주파수 영역 해석법과 신경망을 이용하는 시간영역 해석법 등이 연구되고는 있지만, 이들 방법들은 실제 구조물에 이용하기에는 많은 어려움이 있어 상당한 연구가 더 필요한 실정이다. 특히 기존의 방법들은 측정하고자 하는 부분이나 근처에 기기를 직접 설치해야 하는 어려움이 있었으며, 구조물의 거동 계측에 상당한 장비와 인력 그리고 시간이 소요되어 상시(常時) 진단이 불가능하다는 문제점이 있었다.
- <16> 이에, 최근에는 GPS 위성에서 발신된 GPS반송파를 DGPS(Differential GPS)기준국과 구조물에 각각 설치된 GPS 안테나가 각각 수신한 다음 그 수신된 데이터값을 비교하여 구조물의 실시간 3차원 거동을 측정함으로써 구조물의 안전성을 상시 평가할 수 있는 GPS반송파를 이용한 구조물의 안전성 평가 시스템(국내 특허공개 제99-32608호)이 개발되기도 하였다.
- <17> 그러나, 위 GPS반송파를 이용한 구조물의 안전성 평가 시스템은 구조물에 대한 상시 진단은 가능하지만 해당 구조물에 GPS 안테나를 설치해야 하는 어려움이 있으며, GPS 안테나가 설치된 지점의 거동으로만 구조물을 진단하기 때문에 구조물 전체에 대하여 정확하게 진단할 수 없었을 뿐만 아니라 구조물의 정확한 손상위치와 손상정도 등을 파악하는 데에도 상당한 어려움이 있는 문제점이 있었다.

### 발명이 이루고자 하는 기술적 과제

- <18> 이에, 본 발명은 상술한 바와 같은 종래 구조물 건전성 진단방법들이 가진 문제점을 일소하기 위하여, 라이더를 이용하여 고층건물, 교량, 댐 등의 대형 구조물 전체에 대한 3차원 거동정보를 일정한 시간 주기로 검출하여 그 검출된 정보를 이용하여 구조물 전체에 대한 건전성을 매우 신속하고 정밀하게 진단할 수 있고, 또한, 적은 장비만으로도 구조물에 대한 3차원 거동정보의 신속한 검출이 가능하여 구조물에 대한 상시(常時) 진단이 가능한 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치와 그 진단장치를 이용한 진단방법을 제공하는데 목적이 있다.

### 발명의 구성 및 작용

- <19> 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치는, 빛을 투사하여 그 빛이 구조물 표면에 반사되어 되돌아오는데 걸린 시간으로 거리를 측정하여 구조물의 3차원 형상 정보를 실시간 검출하는 라이더(LIDAR)와; 상기 라이더로부터 실시간 입력되는 구조물의 시간대별 형상 정보를 이용하여 구조물의

정적 거동과 동적 거동을 검출하는 거동분석장치;를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다.

- <20> 위 구성 중 거동분석장치는 상기 구조물에 대한 정적 거동 및 동적 거동 정보를 분석하여 구조물의 건전성을 평가하도록 이루어진 것이 바람직하다.
- <21> 한편, 본 발명에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법은, 구조물에 대한 시계가 확보되는 지점에 설치된 라이더를 이용하여 구조물의 3 차원 형상정보를 일정한 시간주기로 검출하는 형상정보 추출단계; 상기 라이더로부터 주기적으로 입력되는 형상정보를 거동분석장치로써 분석하여 구조물의 정적 거동과 동적 거동을 산출하는 거동분석단계; 그리고, 상기 거동분석장치를 이용하여 상기 거동분석단계에서 산출된 정적 거동 및 동적 거동 정보를 해석하여 구조물의 건전성을 평가하여 그 결과를 출력하는 건전성 평가단계;를 구비하는 것을 특징으로 한다.
- <22> 또한, 본 발명에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법은 상기 형상정보 추출단계 후 상기 라이더로부터 입력되는 형상정보를 이용하여 구조물을 모델링하는 구조물 모델링단계;를 더 포함하고, 상기 거동분석단계는 상기 구조물 모델링 단계에서 모델링된 구조물의 변위와 변형량 분석하여 구조물의 역학적 변화를 해석하도록 이루어지는 것이 바람직하다.
- <23> 특히, 본 발명에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법은 상기 건전성 평가단계에서 거동 정보 해석결과가 사전 지정된 구조물의 사용성과 안전성 범위를 벗어나면 경보신호를 출력하도록 구성되어 구조물의 건전성을 상시 진단할 수 있게 이루어질 수 있다.
- <24> 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치의 구성도이고, 도 2는 그 장치를 이용한 진단방법의 구성을 보인 블록도이다.
- <25> 도 1에 도시된 바와 같이 본 발명의 일 실시예에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치는 고층건물이나 교량과 같은 대형 구조물(3)들에 대한 3차원 형상 정보를 실시간 검출할 수 있는 라이더(1)와; 상기 라이더(1)로부터 실시간 입력되는 구조물의 시간대별 형상 정보를 비교하여 구조물(3)의 정적 거동과 동적 거동을 검출하고 그 정보를 이용하여 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 거동분석장치(2);로 이루어져 있다.
- <26> 라이더(LIDAR)(1)는 빛을 투사한 다음 목적물 표면에 반사되어 되돌아오는 빛을 감지하여 빛이 투사된 후 되돌아오는데 걸린 시간으로 거리를 측정하여 목적물의 3차원 형상 디지털 좌표 정보를 실시간 추출할 수 있는 장비로, 이 장비를 이용하면, 구조물의 3차원 형상 정보를 일정한 시간주기(T)로 추출하여 구조물 전체의 정적 거동과 동적 거동 정보를 획득할 수 있다. 이 라이더(1)의 작동원리는 기존 로케이터(Locater)와 동일하다. 틀린 점이 있다면 음파나 무선신호가 아닌 빛의 반사 신호를 이용한다는 점이다. 이와 같은 라이더(1)는 음파나 무선신호 등을 이용하는 일반 로케이터와 달리 빛을 이용하기 때문에 날씨와 대기오염 등의 영향을 전혀 받지 않는다는 장점이 있다.
- <27> 거동분석장치(2)는 상기 라이더(1)에서 실시간 입력되는 구조물에 전체에 대한 3 차원 형상정보를 이용하여 구조물을 정확하게 실시간 구조 모델링함과 아울러 시간대별로 입력된 형상정보를 비교 분석하여 구조물 전체의 정적 거동과 동적 거동을 정밀하게 추출하도록 프로그래밍된다. 아울러, 추출된 구조물의 정적 거동 및 동적 거동을 구조물 설계시의 정적 거동 및 동적 거동과 비교하여 구조물의 부위별 역학적 변화를 산출함과 아울러 구조물의 각 부위별 변형도와 응력을 계산해 낼 수 있다. 구조물의 강도가 감소하거나 특정 부위가 손상되면, 일반적으로 변형이 크게 발생하고 진동 모드가 달라지게 되는 바, 거동분석장치(2)는 정밀하게 검출한 구조물의 정적 및 동적 거동으로부터 구조물 내의 변형도와 응력을 계측하여 건전성을 평가하는 것은 물론이고 구조물이 손상된 경우 그 손상정도와 손상위치까지 정확하게 찾아낼 수 있다.
- <28> 한편, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조물 건전성 진단방법은 위와 같은 구성의 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치를 이용하는 것으로, 구조물의 3 차원 형상정보를 검출하는 형상정보 추출단계(S1, S2); 검출된 형상정보를 이용하여 구조물을 모델링하는 구조물 모델링단계(S3); 형상정보를 분석하는 정적 거동과 동적 거동을 산출하는 거동분석단계(S4); 그리고, 산출된 정적 거동 및 동적 거동 정보를 이용하여 구조물의 건전성을 평가하는 건전성 평가단계(S5); 등으로 이루어진다.
- <29> 상기 형상정보 추출단계(S1, S2)는 라이더(1)를 이용하여 구조물의 3차원 형상정보를 일정한 시간주기(T)로 실시간 추출하는 단계로, 이는 구조물에 대한 시계가 확보되는 지점에 라이더(1)를 설치한 다음 그 라이더(1)로써 고유주기(TC)를 가지고 거동하는 구조물(3)에 대한 3차원 형상정보(10)를 일정한 시간 간격으로 실시간 검출한다.



- <30> 구조물 모델링단계(S3)에서는 위 형상정보 추출단계(S1, S2)에서 추출한 형상정보를 이용하여 구조물을 일정한 시간 주기로 실시간 모델링하며 그 모델링된 구조물의 이미지를 육안으로 확인할 수 있도록 출력장치(모니터 등)를 통해 실시간 출력한다.
- <31> 거동분석단계(S3)는 상기 라이더(1)로부터 주기적으로 실시간 입력되는 형상정보(10)를 거동분석장치(2)로 분석하여 구조물의 정적 거동과 동적 거동을 검출하는 단계로, 이 단계에서는 구조물의 변위와 변화량 등을 분석하여 구조물의 정적 거동과 동적 거동 정보(20)를 해석하게 된다.
- <32> 건전성 평가단계(S5)는 거동분석장치(2)에 의해 앞서 산출된 정적 거동 및 동적 거동 정보를 이용하여 구조물의 건전성을 최종 진단하는 단계로서, 이 단계에서는 상기 거동분석단계에서 산출된 정적 거동 및 동적 거동 정보를 구조물 설계시 적용된 거동 정보와 비교하여 구조물의 전반적인 건전성을 평가하게 된다. 아울러, 구조물의 역학적 변화를 해석하여 구조물 내 변형도와 응력을 해석하고, 그 결과로서 구조물의 손상여부와 손상부위 그리고 손상정도 등을 예측한다. 일반적으로 구조물의 강도가 작아지거나 특정 부위가 손상되면, 변형이 크게 발생하고 진동 모드가 달라지게 되는데, 건전성 평가단계에서는 앞서 분석한 구조물의 정적 거동과 동적 거동 정보를 활용하여 변형과 진동 등을 분석한 뒤 그 분석결과를 토대로 변형도와 응력을 계산하여 구조물의 손상여부 등을 정확하게 예측해낼 수 있으며, 그 결과로써 보수나 보강이 필요한지 여부를 판단하고 보수나 보강이 필요한 경우에는 보수 및 보강이 필요한 위치를 정확하게 추출해낸다.
- <33> 이상과 같은 과정으로 진행되는 본 발명에 따른 라이더(1)를 이용한 구조물 건전성 진단방법은 구조물의 3차원 거동에 대한 실시간 예측이 가능하여 구조물 전체에 대한 건전성을 매우 신속 정확하게 진단할 수 있고 특히 라이더(1)를 이용한 구조물 건전성 진단장비는 그 구성이 매우 간단하여 구조물에 전용 진단장비로 고정 설치하여 해당 구조물의 건전성을 상시(常時) 진단할 수 있게 구성할 수 있다. 즉, 본 발명에 대한 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치를 특정 구조물에 전용(專用)할 수 있게 고정 설치한 다음, 예컨대 도 2의 점선 내 상시진단 프로그램(SP)과 같이 구조물에 대한 형상정보를 상시로 실시간 검출하여 사용성이나 안전성 등을 평가한 뒤 그 평가결과가 사전에 설정된 사용성이나 안전성 범위를 벗어나 주의를 요하는 상황이 발생하는 경우, 전체 구조물에 대한 모델링을 함과 아울러 경보신호를 발하면서 동시에 구조물의 손상 여부 및 보수나 보강이 필요한 손상 위치 등을 예측해내도록 구성하면, 구조물의 건전성에 대한 상시(常時) 진단이 가능하여 사용기간 경과에 따른 피로파괴나 예측하지 못한 재해 등으로 인한 사고를 미연에 방지할 수 있다.
- <34> 이하, 본 발명의 일 실시예에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치와 그 장치를 이용한 진단방법을 바람직한 실시예를 통하여 보다 구체적으로 살펴본다.
- <35> (실시예)
- <36> 라이더 시스템은 레이저를 이용하여 대상물의 3차원 좌표정보를 관측하는 것으로서 데이터 취득 및 처리가 디지털 방식으로 이루어지므로 기존 영상기반 모니터링 기법에서 요구되는 영상 획득 후 좌표정보 계산을 위한 추가의 연산 과정이 필요 없다. 라이더를 이용한 물체의 3차원 좌표 추출 원리는 도 3과 같이 일정한 거리로부터 물체에 레이저 펄스를 발산시켜 되돌아오는 데 걸리는 시간을 측정하고 레이저펄스의 속도를 이용하여 거리를 계산한다. 수많은 레이저 펄스를 발산시켜 물체와의 떨어진 거리와 레이저 펄스의 각을 이용하여 라이더를 기준한 물체의 상대 3차원 좌표를 획득 할 수 있다.
- <37> 라이더를 이용하여 획득된 대상 구조물의 3차원 좌표는 라이더 제품의 사양에 따라서 약 10 mm 의 오차를 가질 수 있다. 실제 구조물에서 10 mm 내외의 오차는 큰 것으로 여겨진다. 이러한 오차가 최소화된 구조물의 형상 정보를 획득하기 위해서는 3차원 상의 구조물 좌표계와 라이더의 좌표계의 관계 정의 그리고 획득된 형상 좌표에 대한 적절한 데이터 처리 기법이 필요하다.
- <38> 구조물의 변위와 변화량 등을 분석하여 구조물의 정적 거동과 동적 거동 정보(20)를 검출하는 거동분석단계에 관하여, 본 연구에서는 최소제곱법을 이용하여 3차원 좌표값을 근사화하였고 3차원 공간상의 기하학적인 관계를 이용하여 변위계측모델을 개발하였다. 변위계측모델은 i) 라이더를 이용한 획득한 형상 정보를 사용하여 최소제곱법을 적용한 기준 벡터 생성, ii) 기준 벡터를 이용한 라이더 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의 및 좌표 변환 계수결정, 그리고 iii) 구조물 좌표계에서의 변형 계산의 3 가지 부분으로 구성되며 이러한 변위계측모델은 도 4에 나타내었다.
- <39> 라이더를 이용한 형상 정보 획득은 다음과 같이 이루어진다. 지상에 라이더를 고정 시켜 물체의 3차원 좌표를 획득할 수 있는 지상 라이더를 사용하였다. 사용한 지상 라이더의 경우 대상 물체와의 거리가 350 m 이하인 경우는 물체에 반사되어 돌아오는 레이저 펄스의 에너지가 4 % 이상이면 측정이 가능하다. 측정 거리가 증가함에

따라 대상 물체에 발사되는 레이저 스폿간격은 일정하게 증가하게 된다. 발사 위치를 기준으로 측정 대상 거리 5 m 에서 최소 0.13 mm 간격 그리고 최대 13.3 mm 간격으로 좌표 획득이 가능하며 거리 500 m 에서 최소 13 mm 간격 그리고 최대 1330 mm 간격으로 좌표 획득이 가능하다. 그리고 정해진 스폿 간격은 라이다와 물체의 거리 50 m 기준으로 거리에 수직인 면의 수평과 수직 방향으로 최대 7 mm의 오차가 발생가능하며 거리 방향으로 최대 10 mm의 오차가 발생 가능하다. 레이저 펄스는 초당 2000개가 발사되며 반사되어 되돌아오는 시간과 거리를 자동으로 계산하여 물체의 3차원 좌표를 얻게 된다.

<40> 라이다를 이용하여 획득한 형상 정보를 사용하여 최소제곱법을 적용한 기준 벡터를 생성한다. 3차원 좌표로 획득된 구조물의 영상에서 처짐 또는 변위 등의 변형량은 변형 특성을 반영할 수 있는 선 또는 면을 기준으로 하여 계산하게 된다. 라이다를 이용하여 계측된 3차원 좌표 값으로 구성되는 기준 선 또는 면은 오차를 포함하고 있으므로 최소 제곱 근사이론을 이용하여 근사화한다. 그리고 변형량을 계측하기 위해서는 라이다를 기준으로 획득한 3차원 좌표계를 변위 계측을 위한 좌표계로 변환을 해야 한다. 좌표 변환을 하기 위한 기준 벡터는 라이다 좌표계에서 구조물의 형상을 이용하여 생성한다.

<41> 다음으로 기준 선 또는 기준 면을 선정한다. 도 5(a)와 같은 H형강 보의 수직 처짐을 계산을 위한 기준선은 웨브면과 상부 플랜지 면의 교차선 Line\_A, 웨브면과 하부 플랜지 상부면의 교차선 Line\_B, 또는 하부 플랜지 상부 면의 끝선 Line\_C 등이 임의로 선정될 수 있다. 그러나 Line\_A와 Line\_B는 두 면 내에 포함되는 다수의 좌표 정보를 이용하여 기준선이 형성되며 Line\_C는 상대적으로 좌표정보가 적은 하부 플랜지의 끝면을 이용하여 형성된다. 기준을 형성할 때 이용되는 좌표정보가 많으면 많을수록 보다 정밀한 처짐을 계산할 수 있다. 그러므로 변형 계산을 위한 기준선은 라이다로 획득된 영상에서 많은 좌표가 포함된 면들의 교차선을 기준선으로 선정한다. 그리고 도 5(b)와 같이 변형된 구조물의 영상에서 변형된 기준선 Line\_D를 생성한 후 도 5(c)와 같이 비교하여 수직 처짐을 계산한다.

<42> 최소제곱법은 실험 등을 통하여 계측된 데이터 간의 상관관계를 정의할 수 있는 함수를 결정하는 근사화기법이다. 기준선 형성을 위한 면은 최소제곱법을 적용하여 면내에 포함된 좌표값들의 오차를 최소화하면서 형성한다.

<43> 일반적으로 근사화 과정은 우선 데이터의 특성이 반영된  $n$ 차 다항식 등의 함수를 가정하게 되며 가정된 함수의 값과 직접 계측된 데이터 값과의 차이의 제곱을 최소화하는 함수의 계수를 결정하게 된다.

<44>  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ 과 같이 계측된  $m$ 개 데이터를 1차 다항식을 이용하여 근사화하는 경우 1차 다항식의 일반식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

### 수학식 1

$$y = ax + b \quad (1)$$

<45>

<46> 여기서  $x$ 와  $y$ 는 계측된 데이터의 각 좌표축에 대한 좌표 값을 의미하고  $a$ 와  $b$ 는  $m$ 개의 데이터와 최소제곱법을 이용하여 결정해야하는 근사함수의 계수들이다.  $m$ 개의 계측데이터를 식 (1)의 함수로 근사화하면 각 데이터들은  $e_1, e_2, \dots, e_m$ 과 같은 오차를 가지게 되며 이를 일반식으로 나타내면 다음과 같다.

### 수학식 2

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_m & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

<47>

<48> 그리고 이를 매트릭스-벡터로 표현하면 다음과 같다.

### 수학식 3

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\boldsymbol{\xi} + \mathbf{e} \quad (3)$$

<49>

<50> 그러므로 오차 벡터는

### 수학식 4

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\xi} \quad (4)$$

<51>

<52> 로 표현되며 미지수인  $\xi$  벡터는  $e$  벡터 요소의 제곱의 합을 최소화하는 과정에 의하여 다음과 같이 계산된다.

### 수학식 5

$$\boldsymbol{\xi} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (5)$$

<53>

<54> 여기서 예측된 데이터의 수  $m$ 은  $n$ 차 다항식에 존재하는 상수항을 포함한 미지수의 개수  $n+1$ 보다 크거나 같아야 한다.

<55> 3차원 좌표계에서 기준 벡터를 두 개 면의 교선을 이용하여 생성하고자 하기 때문에 우선 획득된 영상에서 기준 벡터를 생성하기 위한 면의 방정식들을 구하여야 한다. 그러나 3차원 좌표로 획득된 면의 영상은 오차를 포함하고 있기 때문에 최소제곱법을 적용하여 벡터를 생성하기 위한 면을 생성한다. 면의 방정식,  $P_i$ 는 식 (5)와 같은 최소제곱법을 적용하여 구할 수 있다. 예로  $y$ 축 방향에 대해서 최소한의 오차를 갖는 면의 방정식을 구한다면 식 (5)에서

### 수학식 6

$$\mathbf{y}' = \begin{bmatrix} y_1' \\ y_2' \\ \vdots \\ y_m' \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}' = \begin{bmatrix} x_1' & z_1' & 1 \\ x_2' & z_2' & 1 \\ \vdots & \vdots & 1 \\ x_m' & z_m' & 1 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} a \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (6)$$

<56>

<57> 로 표현되며 이때 미지수  $a, c, d$ 를 구할 수 있으며 일반화된 면의 방정식으로 표현하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

### 수학식 7

$$P_i: a_i x' + b_i y' + c_i z' + d_i = 0 \quad \text{for } i=1 \text{ to } n_P \quad (7)$$

<58>

<59> 여기서  $x', y', z'$ 은 획득된 영상에서 벡터 생성에 사용되는  $i$ 번째 면을 구성하는 점들의 라이다에 의한 좌표값이다. 그리고  $b_i$ 는 -1이 되고  $a_i, b_i, c_i$ 는 최소제곱법에 의하여 결정되는  $i$ 번째 면의 방정식에 대한 미지계수이다. 그리고  $n_p$ 는 기준 벡터 생성에 이용되는 면의 수를 나타낸다. 도 6에서와 같이 식 (7)로 표현된 두 개의 면  $P_A$ 와  $P_B$ 를 이용한 교선의 방정식,  $n$ 은 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

수학식 8

$$n: \frac{x' - d_l}{l} = \frac{y' - d_m}{m} = \frac{z' - d_n}{n} \quad (8)$$

<60>

<61> 여기서,  $l, m, n$ 은 교선의 방향 벡터를 이루는 방향수이고  $d_l, d_m, d_n$ 은 두 평면의 방정식에서 식 (8)을 유도할 때 생성되는 상수이다. 또한 기준 벡터의 시작점과 끝점의 결정은 도 6에서와 같이 시작점을 포함하는 면,  $P_0$ 와 끝 점을 포함하는 면,  $P_e$ 를 최소제곱법에 의하여 다음과 같이 구한다.

수학식 9

$$P_o: a_o x' + b_o y' + c_o z' + d_o = 0 \quad (9)$$

<62>

수학식 10

$$P_e: a_e x' + b_e y' + c_e z' + d_e = 0 \quad (10)$$

<63>

<64> 여기서  $x', y', z'$ 은 기준 벡터의 시작점과 끝점이 포함된 면을 구성하는 점들의 라이다에 의한 좌표 값이다. 그리고 식 (9)로 표현된 시작점이 포함된 면과 식(8)로 표현된 교선의 교점을 기준 벡터의 시작점,  $O'(x_o', y_o', z_o')$ 로 그리고 식 (10)로 표현된 끝점이 포함된 면과 식(8)로 표현된 교선의 교점을 기준 벡터의 끝점,  $E'(x_e', y_e', z_e')$ 로 놓으면 기준 벡터는 식 (11)과 같이 표현된다.

수학식 11

$$\mathbf{v} = E(x_e', y_e', z_e') - O(x_o', y_o', z_o') \quad (11)$$

<65>

<66> 다음 단계는 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계를 정의하고 좌표 변환 계수를 결정하게 된다. 라이다 좌표계와 구조물의 좌표계의 관계를 정의하는 방법은 다음과 같다.

<67> 기준 벡터는 라이다로부터 획득된 영상 내 각 점까지의 3차원 거리를 나타내는 좌표값에 의하여 생성되므로 도 7과 같이 라이다와 구조물과의 거리 그리고 각도의 변화 따라 변하게 된다. 그러므로 라이다 영상에 나타난 구조물 내부 두 점의 상대적인 좌표값의 차이 또는 이동량은 라이다를 기준으로 한 상대 이동량이므로 구조물의 변형에 직접 이용될 수 없다.

<68> 라이다 영상에서의 상대 이동량을 변형 계측을 위한 구조물 기준 상대 이동량으로 변환하기 위해서는 도 7과 같이 구조물의 변형 특성을 고려한 구조물 좌표계가 정의 되어야 한다. 이러한 두 좌표계 간의 관계는 앞에서 생성된 기준 벡터를 이용하여 구하게 된다. 그리고 주기적으로 구조물의 변형은 라이다에 의하여 획득된 구조물의 변형된 영상을 두 좌표계간의 관계를 이용하여 구조물 좌표계에의 변형된 영상으로 변환하여 계측하게 된다.

<69> 좌표 변환 계수를 결정하기 위한 단계이다. 라이다 좌표계에서 구조물 좌표계로의 3차원 공간에서의 변환은 평행이동과 회전이동으로 구성된다. 평행이동의 경우는 도 8에서와 같이 라이다 좌표계에서 생성된 기준 벡터의 시작점 를 구조물 좌표계의 원점  $O$ 로 이동하게 되며 식 (12)와 같이 표현된다.

수학식 12

$$T_{xyz} = (-x_o', -y_o', -z_o') \quad (12)$$

<70>

<71> 그리고 회전 이동의 경우는 도 8, 도 9와 같이 기준 벡터의 방향이 구조물 좌표계의 축 양의 방향과 일치하도록 변환하게 되며  $x, y, z$ 축의 회전 이동량을  $\mu, \nu, \omega$ 로 정의하면 회전이동은 식 (13)과 같이 표현된다.



### 수학식 13

$$R_{\mu\nu\omega} = R_{\mu} R_{\nu} R_{\omega} \quad (13)$$

<72>

<73>

여기서  $R_{\mu}$ ,  $R_{\nu}$ ,  $R_{\omega}$ 는 다음과 같이 정의된다.

### 수학식 14

$$R_{\mu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu & -\sin \mu \\ 0 & \sin \mu & \cos \mu \end{bmatrix}, R_{\nu} = \begin{bmatrix} \cos \nu & 0 & \sin \nu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \nu & 0 & \cos \nu \end{bmatrix}, R_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

<74>

<75>

이러한 평행이동과 회전이동을 거치면 도 6의 라이다 좌표계에서의 기준 벡터는 도 10에서와 같이 구조좌표계로 표현이 된다.

<76>

변위계측의 마지막 단계로서 구조물 좌표계에서의 변형 계산이 필요하다. 구조물의 변형 계산은 변형된 형상 정보의 획득, 좌표 변환 그리고 좌표변환 된 형상 정보의 오차를 최소화하기 위한 최소제곱법의 적용의 세 가지 단계로 계산된다. 우선 임의의 시점에서 변형된 구조물에 대한 3차원 형상 정보를 라이다를 통하여 획득하고 이를 식 (12), (13)과 같은 좌표변환계수를 이용하여 구조물 좌표계에서의 변형된 구조물의 3차원 형상 정보로 변환한다. 이렇게 구조물 좌표계로 변환된 변형 형상을 이용하여 구조물의 변위를 계측할 수 있으나 오차를 포함하고 있으므로 구조물 좌표계로 변환된 변형된 구조물의 형상을 얻게 되면 구조물의 형상, 하중 양상, 재료의 물성 또는 단면의 특성 등을 고려한 최소제곱법을 적용하여 계산하고자 하는 점이 포함된 면 또는 선의 방정식을 구하여 도 11과 같이 계산하게 된다. 라이다를 이용하여 변위를 계측하게 되면 특정한 점의 이동량은 물론 전체적인 변형 모드 또한 구할 수 있게 된다.

<77>

본 발명에서 제안된 변위계측모델의 적용 방법은 적용 대상에 따라 구조물과 부재 레벨로 구분하여 활용할 수 있다. 구조물 레벨에서의 활용 방안은 고층 건물의 최대 변위와 변형 모드 계측을 들 수 있다. 최대 변위는 고층 건물 최상층 특정 점 또는 부위에 대한 영상을 주기적으로 획득하여 결정할 수 있을 것이며 이러한 결과는 GPS를 활용한 변위 계측기법과 비교하여 검증해야 할 것이다. 그리고 GPS를 이용하는 경우 GPS 수신 안테나 위치에서만 변위가 계측되지만 라이다를 이용하는 경우 건물 두 외벽 면이 교차하는 형성되는 모서리를 기준 벡터로 하여 건물 전체의 변형 모드 또한 계측 가능할 것으로 예상된다.

<78>

부재 레벨에서의 활용방안은 장스팬 거더의 수직 처짐 그리고 스페이스 프레임에 포함된 대공간 구조물의 변형 및 변형 모드 계측에 활용될 수 있을 것이다. 또한 이러한 부재 레벨 변형 계측의 경우 구조물 내부에서 모니터링이 이루어져야 하므로 현재 개발되어 있는 GPS 안테나를 이용한 변위 계측은 인공위성에서부터의 신호 수신에 불가능하므로 본 발명에서 개발한 모델이 현실적인 대안이 되리라 예상된다.

<79>

라이다를 이용한 변위계측모델에서는 구조물의 변형 형상을 나타내는 영상의 각 점들에 대한 3차원 좌표를 얻을 수 있으므로 각 점의 3차원 좌표를 유한요소해석법의 절점에 대한 좌표로 활용하여 구조물 또는 부재를 3D 모델링할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 경우 주기적으로 구조물 또는 부재의 변형을 계측하고 계측된 3차원 변위를 절점의 변위하중으로 작용시켜 해석하게 되면 구조물의 응력 및 안전성 모니터링 기법으로도 활용가능하다.

### 발명의 효과

<80>

본 발명에 따른 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치와 그 진단장치를 이용한 진단방법에 따르면, 고층건물, 교량, 댐 등의 대형 구조물 전체에 대한 정밀한 3차원 거동정보를 일정한 시간 주기로 실시간 검출한 다음 검출된 정보를 이용하여 구조물 전체에 대한 건전성을 저렴한 비용으로 매우 신속하고 정밀하게 진단할 수 있음 물론 구조물 전체에 대한 변형도와 응력 해석이 가능하여 구조물의 손상여부는 물론 손상위치와 손상정도 등을 정확하게 계측해낼 수 있는 바, 구조물 건전성 진단에 소요되는 시간과 비용을 획기적으로 절감할 수 있다. 또한, 진단장치의 구성과 방법이 극히 단순하고 구조물에 대한 3차원 거동정보의 실시간 검출이 가능하여 구조물의 건전성을 상시(常時) 진단할 수 있게 구성할 수 있는데 이렇게 하면 피로파괴나 예측하지 못한 재해 등으로 인한 구조물 사고를 미연에 방지할 수 있다.

<81>

라이다에 의한 변위계측모델에서는 특정한 점의 이동량은 물론 변형된 구조물의 형상을 표현하는 점들의 3차원

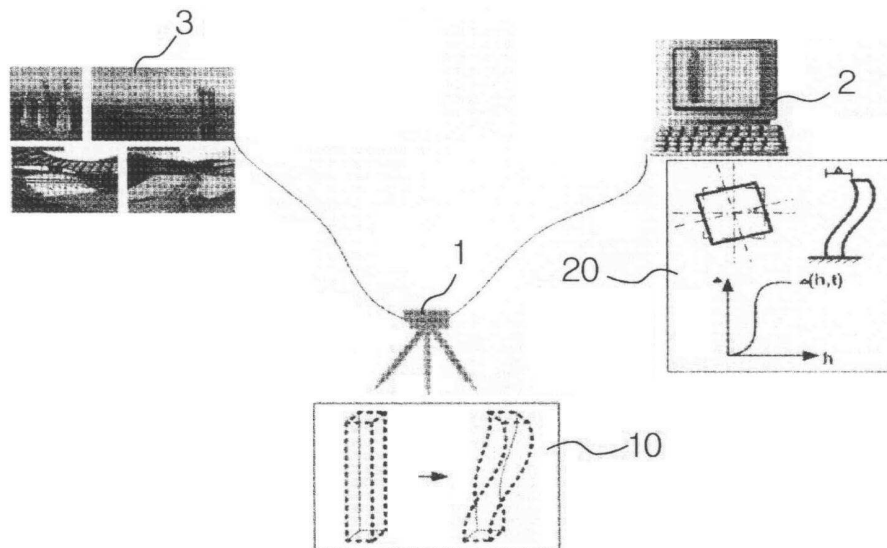
좌표를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 변형된 구조물의 영상을 표현하는 각 점을 유한요소해석법의 절점으로 표현하고 주기적으로 계측되는 각 절점의 3차원 이동량을 절점의 변위하중으로 모델링 할 수 있는 프로그램을 개발하여 변위계측모델과 접목하게 되면 구조물의 안전성과 사용성을 보다 합리적으로 모니터링하고 평가할 수 있는 대안이 될 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

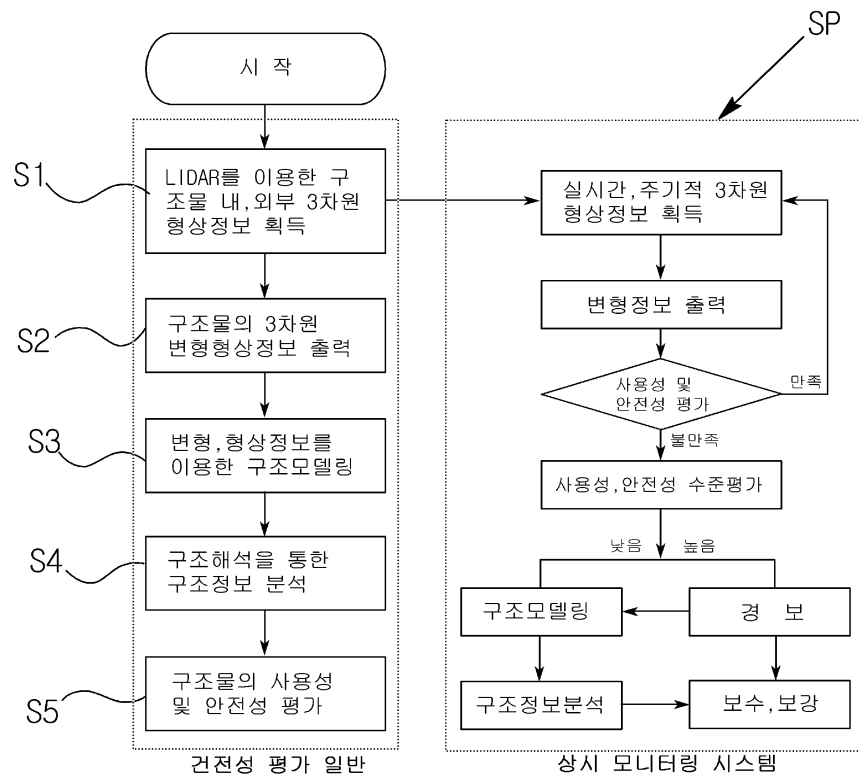
- <1> 도 1은 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단장치의 구성도,
- <2> 도 2는 라이더를 이용한 구조물 건전성 진단방법을 나타낸 순서도,
- <3> 도 3은 라이더를 이용한 3차원 좌표 추출 원리,
- <4> 도 4는 변위계측모델 개념도,
- <5> 도 5는 H 형강 보의 수직 처짐 계산을 위한 기준선으로서 (a) 변형 전 기준선, (b) 변형 후 기준선, (c) 변형 전, 후의 기준선 입면,
- <6> 도 6은 면을 이용한 기준 벡터의 생성,
- <7> 도 7은 라이더 좌표계와 구조물 좌표계,
- <8> 도 8은 좌표 변환,
- <9> 도 9는 회전 이동,
- <10> 도 10은 좌표 변환 후 기준 벡터,
- <11> 도 11은 구조 좌표계에서 변위 계측을 나타낸 것이다.

### 도면

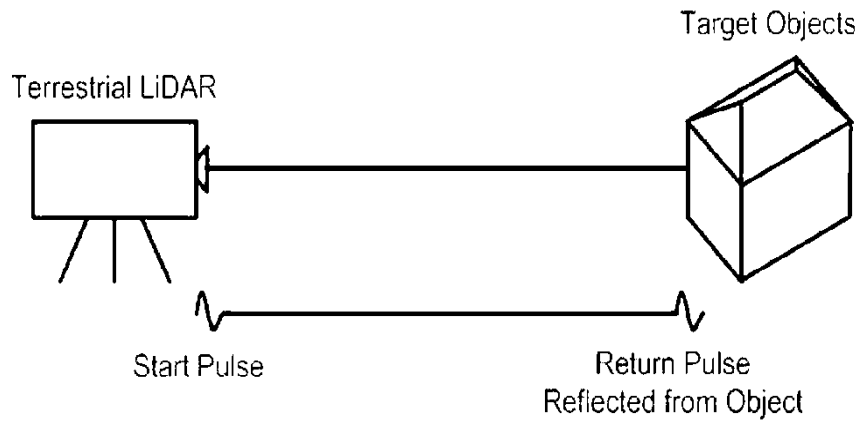
도면1



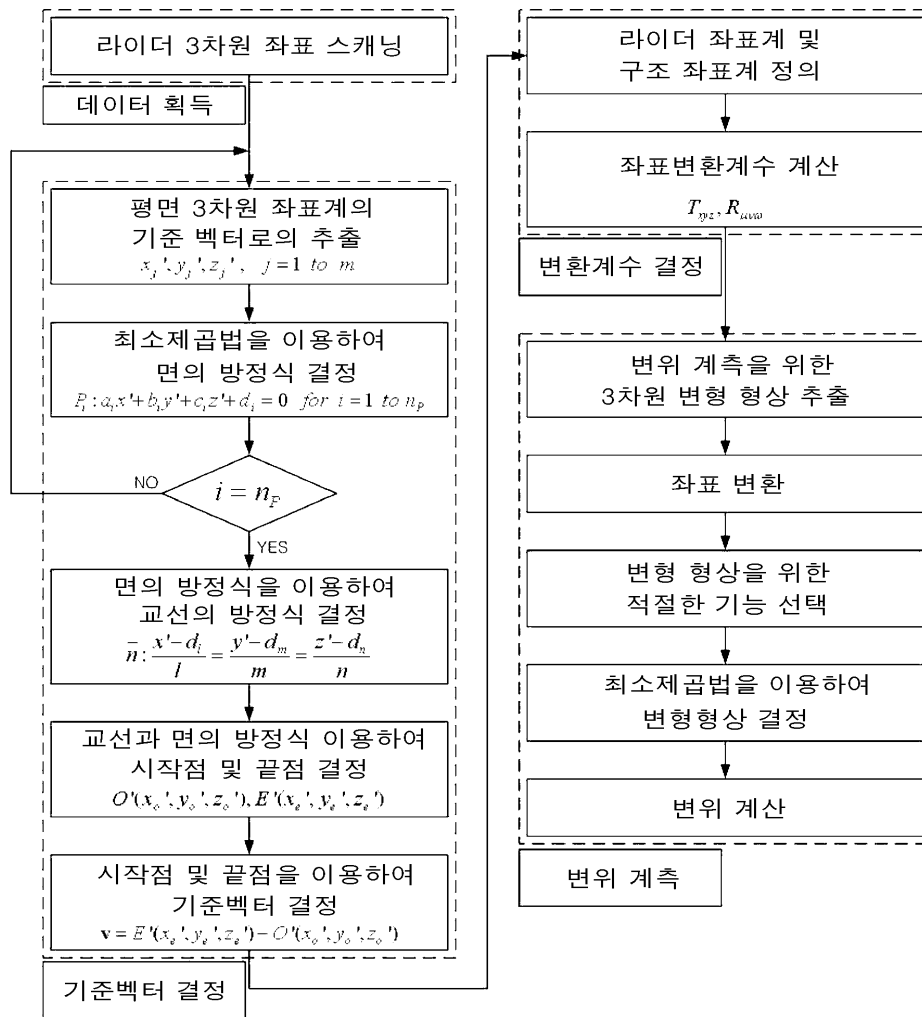
도면2



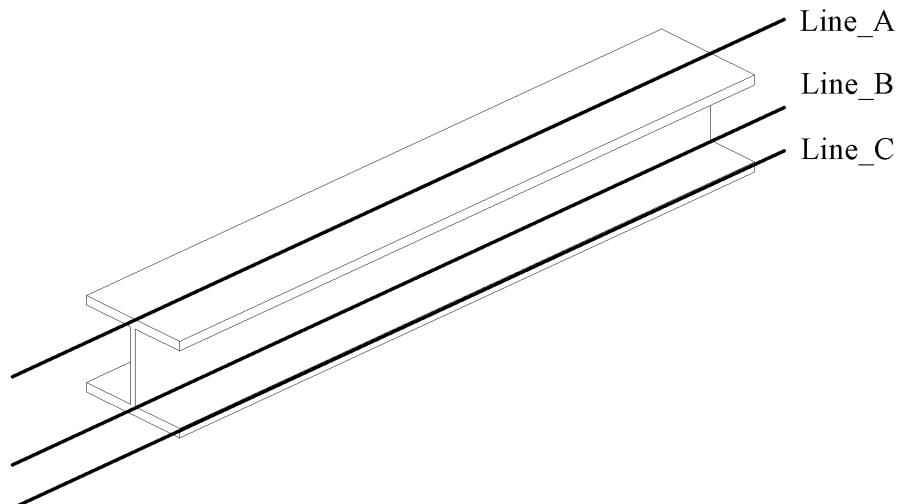
도면3



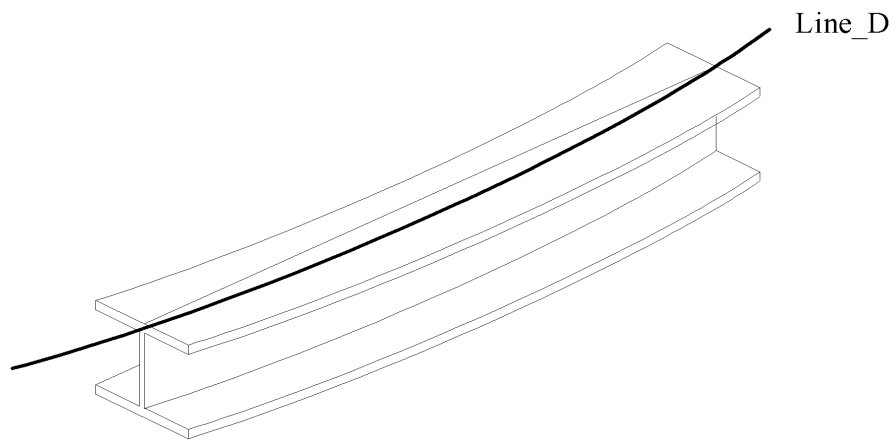
도면4



도면5a



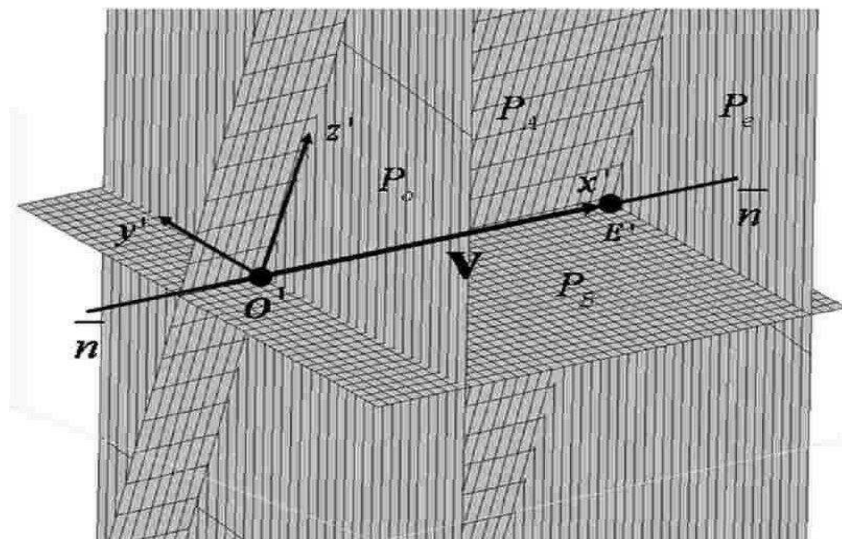
도면5b



도면5c

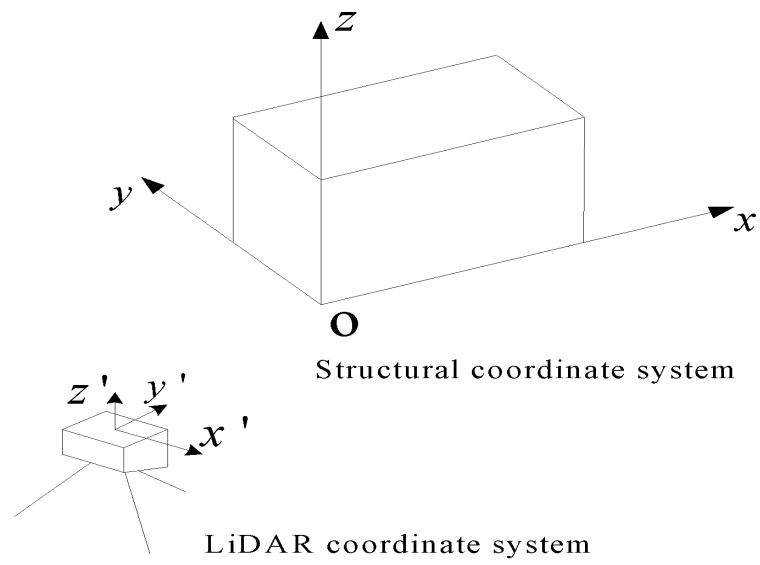


도면6

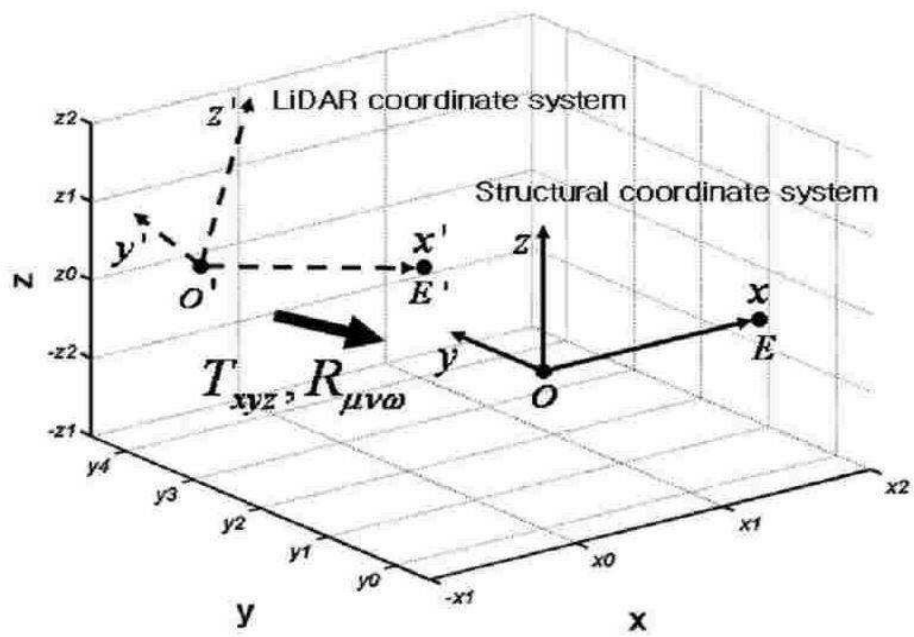




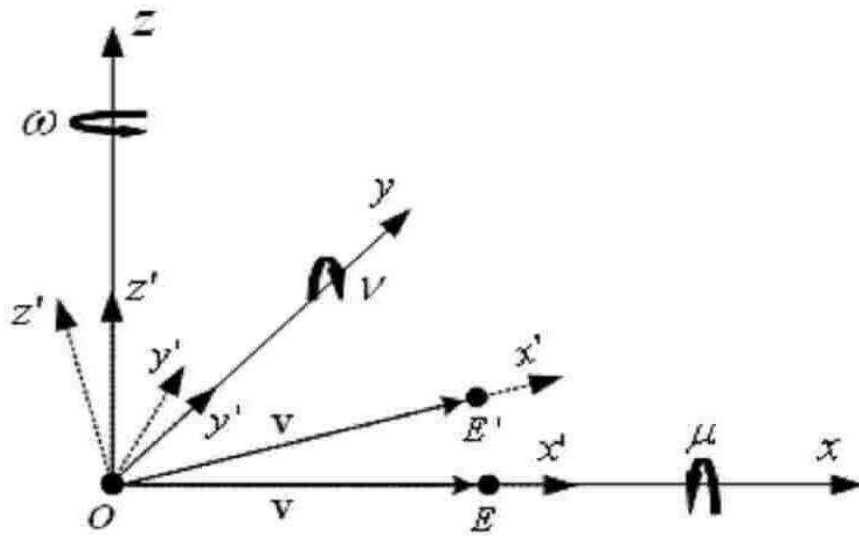
도면7



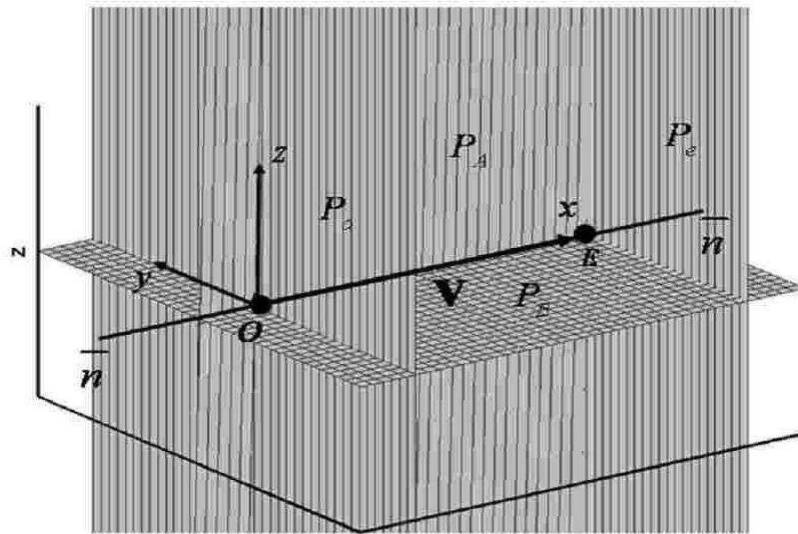
도면8



도면9



도면10



도면11

