

# 지상라이다를 이용한 구조물의 안전 및 사용성 평가 모델

## Assessment Model for the Safety and Serviceability of Structures using Terrestrial LiDAR

이 홍 민\* / 박 효 선\*\*

Lee, Hong Min / Park, Hyo Seon

### Abstract

Structural health monitoring is important to maintain the safety and serviceability of the structures. The displacement in the structure should be precisely and frequently monitored because it is a direct assessment index indicating its stiffness. However, no practical method has been developed to monitor such displacement precisely, particularly for high-rise buildings and long span bridges because they cannot be easily accessible. To overcome such difficult accessibility, we propose to use a LIDAR system that remotely samples the surface of an object using laser pulses and generates the coordinates of numerous points on the surface. In this study, using terrestrial LiDAR, we develop a novel displacement measuring model for structural health monitoring and perform an indoor experiment to prove its performance.

**key words** : Health monitoring, Displacement measurement, safety evaluation, LiDAR system

### 요 지

구조물의 건전성 모니터링은 구조물의 안전 및 사용성을 위하여 중요하다. 구조물의 변위는 직접적인 구조물 강성의 평가 지표가 되기 때문에 정확하고 주기적으로 모니터 되어야 한다. 그러나 이러한 변위 모니터를 위한 실용적인 방법이 아직까지 없고, 특히 고층 건물이나 장 스패 교량과 같이 접근성이 어려운 구조물의 경우는 더욱 그러하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 레이저 펄스를 이용하여 원격으로 물체 표면을 탐사하고 수많은 좌표를 생성할 수 있는 라이다 시스템을 제안하였다. 본 연구에서는 지상 라이다를 이용하여 구조물의 헬스 모니터링을 위한 새로운 변위계측모델을 개발하였고 검증용 실험이 수행되었다.

**핵심용어** : 헬스 모니터링, 변위 계측, 안전성 평가, 라이다 시스템

## 1. 서 론

구조물의 구조 반응은 안전성과 사용성의 두 가지 그룹으로 나누어 질 수 있다. 구조물의 안전성에 관련된 구조 반응들은 하중지지 능력 평가에 이용되는 것으로 대표적으로 부재들의 응력 수준을 들 수 있다.

그리고 사용성에 관련된 구조 반응들은 구조물의 변형에 대한 저항 성능 평가에 이용되는 것으로 대표적으로 최대변위, 중간변위, 수평진동 수준 등을 들 수 있다. 구조해석 시 모델링에 적용된 가정, 설계 도면과 시공의 차이, 작용 하중의 변화 등의 다양한 이유에 의하여 시공된 구조물의 구조 반응들은 설계 시 평가된 수준과는 현실적으로 다르다. 또한 시공 후 시간

\* 연세대학교 대학원 건축공학과 박사과정 (e-mail : idislee@yonsei.ac.kr)

\*\* 정희원 · 연세대학교 건축도시공학부 부교수

이 경과하면서 피로가 누적되거나 예상치 못한 하중 및 기타 여러 가지 원인들에 의하여 구조 부재 또는 접합부의 역학적 성능이 변화하게 된다. 그러므로 시공된 구조물의 안전성과 사용성을 합리적으로 확보하고 유지관리하기 위해서는 구조 반응들을 주기적으로 평가할 필요가 있다. 이러한 이유로 최근 건축 및 토목 등의 분야에서 구조물의 안전성과 사용성을 객관적으로 평가하기 위한 모니터링 기법들이 활발하게 연구되고 있다(Celebi, 2000; Tamura et al, 2002; Breuer et al, 2002).

본 연구와 비슷하게 빛을 이용하여 구조물 또는 부재의 변위를 측정할 수 있는 기법에 관한 연구로는 사진 측량학 분야의 기술을 응용한 영상기반 모니터링 기법이 있다. 디지털 사진기를 이용한 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법은 렌즈를 통해 사진기에 투영된 광학상의 세기에 비례하여 발생하는 전하의 영상소자 디지털 신호를 이용하여 물체의 위치를 결정하는 기법으로 일반적으로 하나의 탐측요소가 10  $\mu\text{m}$ 보다 작으며 제조과정에서의 정확도는 약 1/10  $\mu\text{m}$ 이다. Olaszek (1999)은 망원렌즈가 장착된 디지털 CCD(Charge Coupled Device) 사진기를 사용하여 특정위치의 변위를 측정하였다. 변위 측정의 정밀도에 영향을 주는 다양한 요인(측정 장치, 영상 처리 과정, 대기 난류, 참조 포인트 유무 등)을 정리하였고, 5 Hz의 주파수 범위 이내에서 정적, 동적으로 0.1-1.0 mm의 정밀도를 갖는 변위를 측정하였다. Fraser and Riedel (2000)은 3대의 디지털 CCD 사진기를 사용하여 사진 삼각측량법으로 온도에 따른 강재 보의 변위를 측정하였다. 1200-0  $^{\circ}\text{C}$ 의 온도변화에 대한 변위를 0.7-1.3 mm의 오차범위 이내에서 측정하였다. Wahbeh 등(2003)은 디지털 사진기와 2개의 LEDs(light emitting diodes) 표적을 사용하여 장 스펙트럼의 특정 부분의 변위를 측정하였다. 디지털 사진기로 획득한 영상으로부터 필요한 정보를 추출하기 위해 대형 구조물에서 중요한 작은 주파수를 추출할 수 있는 적분 알고리즘을 사용하였고 다른 연구 결과와 비슷한 결과(변위 1.5-2.2 inch, 1차모드 0.23 Hz, 2차모드 0.36 Hz)를 도출해 내었다. 이러한 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법의 경우 다수의 사진기가 필요하거나 정밀도 향상을 위하여 구조물 이외의 고정된 지점과 사진기와의 정밀한 거리 측량이 필요하며 또한 구조물에 고정된 반사 표적을 설치해야하는 단점을 가지고 있다.

최근 GIS 분야에서 사용되는 ALS(Airborn Laser Scanning) 시스템으로 불리는 LiDAR(Light Detection

And Ranging, 라이다)는 상대적으로 환경의 영향을 크게 받지 않으며 특정 위치가 아닌 건물 또는 대상물의 전체의 형상에 대한 3차원 위치 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다(Ackemann, 1999). 이러한 라이다 시스템을 구조물의 안전성 및 사용성 모니터링에 적용하게 되면 구조물의 특정한 부분의 3차원 변위 및 변형모드를 동시에 측정할 수 있다. 그러나 아직까지 토목 또는 건축 구조 분야에서 라이다를 이용하여 구조물의 변위 또는 변형모드의 측정에 대한 적용성을 시도한 적이 없다.

본 연구에서는 라이다를 이용하여 구조물의 안전 및 사용성 평가를 위한 변위 및 변형 모드 측정 모델을 제시하고 모델의 적용성을 실험을 통하여 검증하고자 한다. 제시된 모델의 적용성을 검증하기 위하여 2점 집중하중을 받는 단순지지된 철골 보의 휨 실험을 하였다. 라이다 시스템으로부터 철골 보의 처짐 값을 구하였으며 이를 LVDT로 직접 측정한 처짐 값과, 전기저항식센서와 광변형센서를 이용하여 측정한 변형률로부터 계산된 처짐 값을 비교하였다. 또한 전기저항식센서를 이용하여 측정한 변형률로부터 응력을 계산하고 항복강도를 기준으로 하여 라이다 시스템의 오차를 확인하였다.

## 2. 라이다의 구성과 특징

라이다 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. 라이다를 이용한 물체의 3차원 좌표 추출 원리는 그림 1과 같이 일정한 거리로부터 물체에 레이저 펄스를 발산시켜 되돌아오는데 걸리는 시간을 측정하고 레이저펄스의 속도를 이용하여 거리를 계산한다. 측정 대상 물체에 수개의 레이저 펄스를 발산시켜서 물체와의 떨어진 거

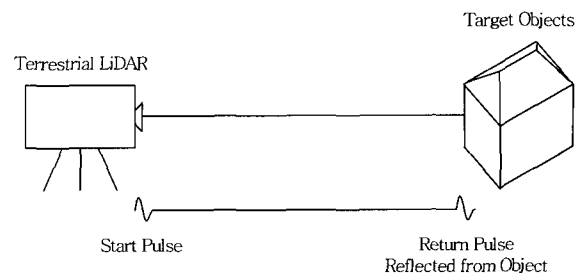


그림 1. 라이다를 이용한 3차원 좌표 추출 원리

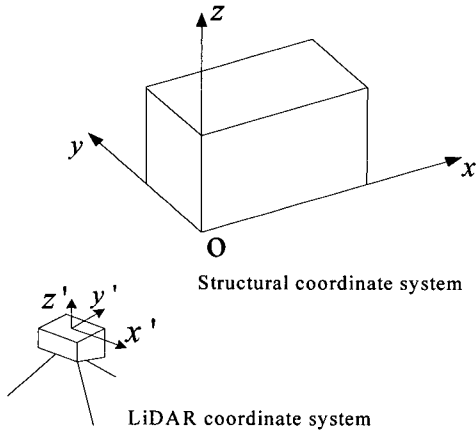


그림 2. 라이다 좌표계와 구조물 좌표계

리와 레이저 펄스의 각의 측정으로 라이다를 기준한 물체의 상대 3차원 좌표를 획득할 수 있다.

### 3. 라이다를 이용한 구조물의 변위계측모델

라이다를 이용하여 획득된 대상 구조물의 3차원 좌표는 측정 거리방향에 대해서 수평 및 수직 오차 그리고 거리 오차를 가질 수 있다. 이러한 오차가 최소화된 구조물의 형상 정보를 획득하기 위해서는 3차원 상의 구조물 좌표계와 라이다의 좌표계의 관계 정의 그리고 획득된 형상 좌표에 대한 적절한 데이터 처리 기법이 필요하다. 본 연구에서는 최소제곱법을 이용하여 3차원 좌표 값을 근사화하였고 3차원 공간상의 기하학적인 관계를 이용하여 변위계측모델을 개발하였다. 변위계측모델은 i) 라이다를 이용한 형상 정보 획득, ii) 최소제곱법과 3차원 기하학적 특성을 이용한 기준 벡터 생성, iii) 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의, 그리고 iv) 구조물 좌표계에서의 변형 계산의 4 가지 부분으로 구성되며 각각의 내용은 다음과 같다.

#### 3.1 라이다를 이용한 형상 정보 획득

본 연구에서는 지상에 라이다를 고정 시켜 물체의 3차원 좌표를 획득할 수 있는 Optech's ILRIS-3D 지상 라이다를 사용하였다. 레이저 펄스의 스폿 간격은 라이다와 물체의 거리 50 m 기준으로 거리에 수직 한 면의 수평과 수직 방향으로 최대 7 mm의 오차가 발생 가능하며 거리 방향으로 최대 10 mm의 오차가 발생 가능하다. 레이저 펄스는 초당 2000개가 발생되며 반사되어 되돌아오는 시간과 거리를 자동으로 계산하여 물체의 3차원 좌표를 얻게 된다. 라이다를 이용

하여 구조물의 형상 정보를 획득할 경우에 변위계측모델의 적용이 가능하도록 구조물의 기하학적인 형태, 구조적인 거동 등의 특성을 고려하여 측정 거리, 측정 방향, 좌표 획득 및 레이저 스폿 간격 등을 사전에 계획할 필요가 있다.

#### 3.2 최소제곱법과 3차원 기하학적 특성을 이용한 기준 벡터 생성

3차원 좌표로 획득된 구조물의 영상에서 처짐 또는 변위 등의 변형량은 변형 특성을 반영할 수 있는 선 또는 면을 기준으로 하여 계산하게 된다. 라이다를 이용하여 측정된 3차원 좌표 값으로 구성되는 기준 선 또는 면은 오차를 포함하고 있으므로 최소제곱법을 이용하여 근사화 한다(Anton, 2000). 그리고 변형량을 측정하기 위해서는 라이다를 기준으로 획득한 3차원 좌표계를 변위 계측을 위한 좌표계로 변환을 해야 한다. 좌표 변환을 하기 위한 기준 벡터는 라이다 좌표계에서 구조물의 기하학적 특성을 이용하여 생성한다.

#### 3.3 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의

기준 벡터는 라이다로부터 획득된 영상 내 각 점까지의 3차원 거리를 나타내는 좌표값  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ 에 의하여 생성되므로 그림 2와 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 이동량으로 구조물의 변형에 직접 이용될 수 없다. 라이다 영상에서의 상대 이동량을 변형 계측을 위한 구조물 기준 상대 이동량으로 변환하기 위해서는 그림 2와 같이 구조물의 변형 특성을 고려한 구조물 좌표계가 정의되어야 한다. 이러한 두 좌표계 간의 관계는 앞에서 생성된 기준벡터를 이용하여 구하게 된다. 그리고 주기적으로 구조물의 변형은 라이다에 의하여 획득된 구조물의 변형된 영상을 두 좌표계간의 관계를 이용하여 구조물 좌표계에의 변형된 영상으로 변환하여 계측하게 된다.

#### 3.4 구조물 좌표계에서의 변형 계산

구조물의 변형 계산은 변형된 형상 정보의 획득, 좌표 변환 그리고 좌표 변환 된 형상 정보의 오차를 최소화 하기위한 최소제곱법의 적용의 세 가지 단계로 계산되어 진다. 우선 임의의 시점에서 변형된 구조물에 대한 3차원 형상정보를 라이다를 통하여 획득하고,

라이다 좌표계와 구조물의 좌표계의 관계를 이용하여 구조물의 3차원 형상 정보를 변환한다. 이렇게 변환된 변형 형상을 이용하여 구조물의 변위를 계측할 수 있으나 오차를 포함하고 있으므로 본 논문에서는 구조물 좌표계로 변환된 구조물의 형상에 최소제곱법을 적용하여 변형 형상을 계산한다. 구조물의 실제 변형 형상을 계산하기 위해서는 구조물의 형상, 하중 양상, 재료의 물성 또는 단면의 특성 등을 적절하게 고려하여 최소제곱법을 적용한다.

#### 4. 변위계측모델의 적용

제시된 계측모델의 적용성을 검증하기 위하여 2점 집중하중을 받는 단순지지된 철골 보의 휨 실험을 하였다. 실험체는 그림 3과 같이 단순지지된 철골 보(H-200×200×8/12, SM490)이며 횡 좌굴 없이 강축 방향으로 순수 휨이 작용하도록 설치하였고 전기저항식센서와 광변형센서, 그리고 LVDT를 그림 4와 같이 설치하였다. 철골 보의 L/3, 2L/3 지점에 크기가 다른 정적하중(Step 1~6)을 가력하고 전기저항식센서, LVDT를 이용하여 철골 보의 L/6, L/3, L/2, 2L/3, 5L/6 지점에서 각각 변형률, 변위를 측정하였고 광변형센서를 이용하여 평균 변형률을 측정하였다. 그리고 라이다를 이용하여 3차원 형상 정보를 획득하였고 변위계측모델을 적용하여 처짐 및 응력을 계산, 비교하였다. 여기에서는 LVDT 처짐 측정 기준 6번째 단계(Step 6)의 철골 보의 처짐 형상에 대한 좌표 정보를 예로 들어 변위계측모델에 대한 내용을 정리하였다.

##### 4.1 라이다를 이용한 3차원 형상 정보 획득

라이다를 이용한 실험체의 처짐 형상 획득은 그림 3의 실험체에서 약 7m 거리를 두고 측정하였으며, 보



그림 3. 실험체

의 웨브 및 상부 플랜지가 모두 측정 되도록 일정한 경사를 두었다. 좌표 변환을 위한 기준 벡터를 생성하기 위해서 철골 보의 변형 전 상부 플랜지와 웨브의 3차원 형상 정보를 획득하였고, 보의 처짐 양상을 구하기 위하여 변형 후의 상부 플랜지의 3차원 형상 정보를 획득하였다.

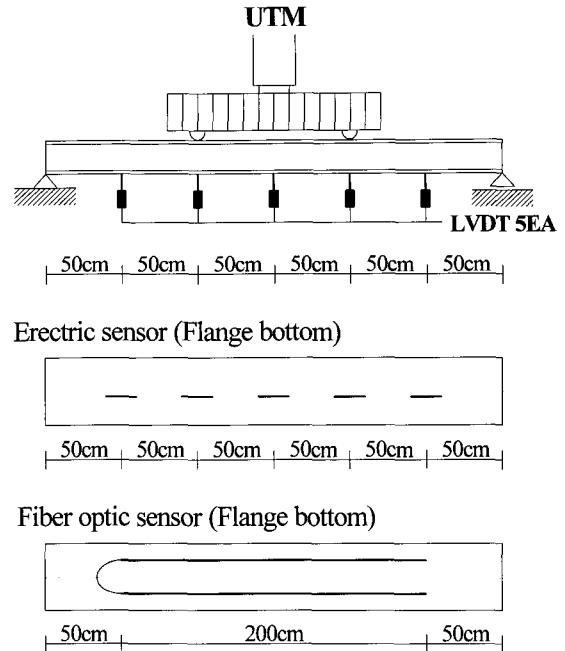


그림 4. LVDT 및 변형률 계측 센서 설치

##### 4.2 입력 데이터 생성

그림 5는 라이다를 이용하여 철골 보의 3차원 형상 정보를 획득한 영상이다. 상부 플랜지의 L/3, 2L/3 일정부분은 가력 점이었기 때문에 플랜지의 3차원 좌표 정보를 획득하지 못했다. 본 실험의 변위계측모델에서는 플랜지와 웨브의 평면의 방정식을 최소제곱법을 이용하여 생성하고 생성된 평면의 방정식의 기하학적 특성을 이용하여 기준 벡터를 생성하였다. 플랜지와 웨브의 3차원 형상 정보를 이용하여 각각의 평면의 방정식을 생성하기 위해서는 철골 보를 웨브와 플랜지로 구분하여 입력 데이터를 생성한다. 또한 변형 후의 플랜지의 3차원 형상 정보를 이용하여 보의 처짐 값을 알기 위하여 그림 6과 같이 변형 후의 플랜지에 대한 3차원 형상이 필요하다. 변형 전의 플랜지, 웨브의 3차원 형상 정보를 이용하여 기준 벡터를 생성하여 변위 계측을 위한 좌표계로 변환하고, 변형후의 플랜지의 3차원 형상 정보를 이용하여 변위를 계측할 수 있다. 변위계측모델에 사용된 3차원 형상 정보 입력 데이터는 변형 전 플랜지와 웨브의 3차원 형상 정보, 변형 후 플랜지의 3차원 형상 정보 이렇게 3가지 형태

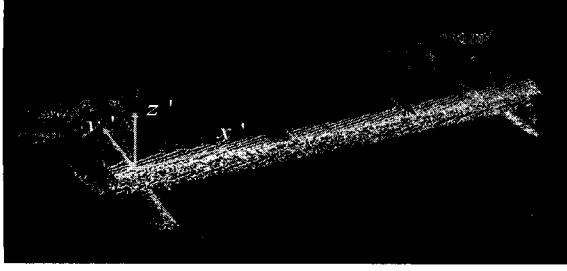


그림 5. 라이다 3차원 형상 정보 획득 영상

의 3차원 좌표 정보이다. 본 실험에서 라이다 측정 방향이 보의 상부 플랜지면과 수평에 가깝고 웨브면과 수직에 가깝기 때문에 웨브면에서의 3차원 좌표 정보의 획득 양이 많음을 알 수 있다. 웨브에서는 약 30000개의 3차원 좌표를 이용하였고, 상부 플랜지에서는 약 5000개의 3차원 좌표를 이용하였다.

### 4.3 좌표 변환을 위한 기준 벡터 생성

변형 전의 웨브와 상부 플랜지의 평면의 방정식은 최소제곱법을 이용하여 구할 수 있다(그림 7). 웨브 및 플랜지, 즉,  $y$ 축 및  $z$ 축 방향에 대해서 최소한의 오차를 갖는 면의 방정식을 구한다면 식 (1), (3)에서 미지벡터  $\xi_w$ ,  $\xi_f$ 를 구할 수 있으며 이때 일반화된 면의 방정식으로 표현하면 식 (2), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y' = A_w' \xi_w + e \quad (1)$$

$$y' = \begin{bmatrix} y_1' \\ y_2' \\ \vdots \\ y_{29486}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.15723 \\ 7.16917 \\ \vdots \\ 7.24008 \end{bmatrix},$$

$$A_w' = \begin{bmatrix} x_1' & z_1' & 1 \\ x_2' & z_2' & 1 \\ \vdots & \vdots & 1 \\ x_{29486}' & z_{29486}' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.90088 & 0.25736 & 1 \\ 1.90030 & 0.21372 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1.08968 & 0.27996 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\xi_w = \begin{bmatrix} a_w \\ c_w \\ d_w \end{bmatrix}$$

단위 : m

$$P_{web} : a_w x' + b_w y' + c_w z' + d_w = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$a_w = -0.0433, b_w = -1, c_w = -0.1884, d_w = 7.2710$$

$$z' = A_f' \xi_f + e \quad (3)$$

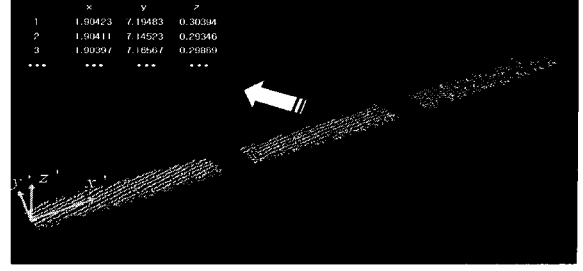


그림 6. 상부 플랜지의 변형 후 3차원 형상 정보

$$z' = \begin{bmatrix} z_1' \\ z_2' \\ \vdots \\ z_{4689}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30324 \\ 0.29792 \\ \vdots \\ 0.34410 \end{bmatrix},$$

$$A_f' = \begin{bmatrix} x_1' & y_1' & 1 \\ x_2' & y_2' & 1 \\ \vdots & \vdots & 1 \\ x_{4689}' & y_{4689}' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.90420 & 7.18289 & 1 \\ 1.90216 & 7.16107 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1.09391 & 7.15051 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\xi_f = \begin{bmatrix} a_f \\ b_f \\ d_f \end{bmatrix}$$

단위 : m

$$P_{flange} : a_f x' + b_f y' + c_f z' + d_f = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$a_f = -0.0170, b_f = 0.2008, c_f = -1, d_f = -1.1075$$

이때, 식(2)와 (4)로 나타낸 두 평면이 이루는 각은  $89.36^\circ$ 로 서로 이루는 각이 직교에 가까움을 알 수 있고 본 연구에서 구하고자 하는 값에 대해서 허용할 만한 오차라는 것을 확인할 수 있다. 경사를 두고 있는 두 평면의 방정식( $P_{web}, P_{flange}$ )을 이용하여 교차하는 교선의 방정식( $\bar{n}$ )은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{n} : \frac{x' - d_l}{l} = \frac{y' - d_m}{m} = \frac{z' - d_n}{n} \quad (5)$$

여기서,

$$d_l = 0, d_m = 0.1783, d_n = 0.0131,$$

$$l = 1046.15, m = -40.43, n = -25.88$$

웨브의 모든 3차원 좌표에서 보의 양 지점에 근접한 두 개의 좌표  $x_i', x_t'$ 를 찾을 수 있고, 두 개의  $x'$ 축 좌표  $x_i', x_t'$ 를 포함하는 좌표  $(x_i', y_i', z_i')$ ,

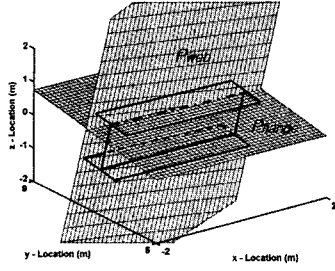


그림 7. 평면 생성 ( $P_{web}, P_{flange}$ )

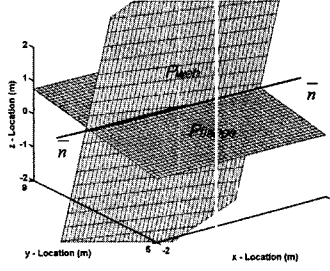


그림 8. 교선 생성 ( $\bar{n}$ )

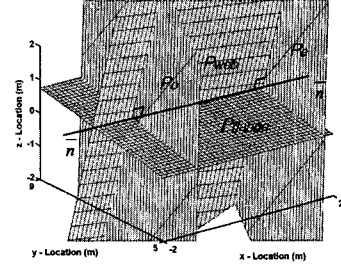


그림 9. 평면 생성 ( $P_o, P_e$ )

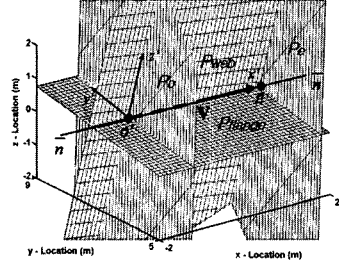


그림 10. 기준 벡터 생성 ( $\mathbf{v}$ )

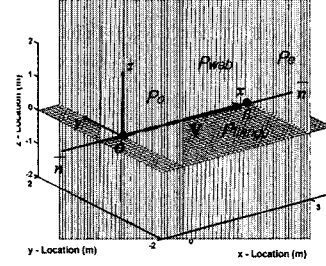


그림 11. 구조물 좌표계로 변환

$(x'_t, y'_t, z'_t)$ 를 식 (6), (7)과 같이 구할 수 있다.

$$(x'_i, y'_i, z'_i) = (-1.08968, 7.24008, 0.27996) \quad (6)$$

$$(x'_t, y'_t, z'_t) = (1.90088, 7.15723, 0.25736) \quad (7)$$

식 (6), (7)에서 좌표  $(x'_i, y'_i, z'_i), (x'_t, y'_t, z'_t)$ 를 지내고 식 (5)에서 구한 교선( $\bar{n}$ )에 수직하는 두 평면의 방정식( $P_o, P_e$ )은 식 (8), (9)와 같이 구할 수 있고 그림 9와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_o : l(x' - x'_i) + m(y' - y'_i) + n(z' - z'_i) = 0 \quad (8)$$

$$P_e : l(x' - x'_t) + m(y' - y'_t) + n(z' - z'_t) = 0 \quad (9)$$

두 평면의 방정식( $P_o, P_e$ )과 교선의 방정식( $\bar{n}$ )이 교차하는 교차점  $O'(x'_o, y'_o, z'_o), E'(x'_e, y'_e, z'_e)$ 를 이용하여 기준 벡터를 생성 할 수 있다. 각각의 교차점은 식 (10), (11)과 같고 여기서 생성된 기준 벡터( $\mathbf{v}$ )는 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$O'(x'_o, y'_o, z'_o) = (-1.08720, 7.24900, 0.36632) \quad (10)$$

$$E'(x'_e, y'_e, z'_e) = (1.90080, 7.13360, 0.29241) \quad (11)$$

#### 4.4 기준 벡터를 이용한 좌표 변환

식 (10), (11)에서 교차점  $O'(x'_o, y'_o, z'_o), E'(x'_e, y'_e, z'_e)$ 를 구한 기준 벡터를 이용하여 라이다 좌표계를 구조물 좌표계로 변환 할 수 있는 좌표 변환 계수는 식 (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{xyz} = (1.08720, -7.2490, -0.36632) \quad (12)$$

$$R_{\mu\nu\omega} = \begin{bmatrix} 0.99895 & -0.03861 & -0.02471 \\ 0.04271 & 0.97968 & 0.19596 \\ 0.01664 & -0.19681 & 0.98030 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서,  $R_\mu, R_\nu, R_\omega$ 는 다음과 같다.

$$R_\mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.98060 & 0.19602 \\ 0 & -0.19602 & 0.98060 \end{bmatrix},$$

$$R_\nu = \begin{bmatrix} 0.99969 & 0 & -0.02471 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.02471 & 0 & 0.99969 \end{bmatrix},$$

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 0.99925 & -0.03862 & 0 \\ 0.03862 & 0.99925 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

라이다 좌표계에서의 상부 플랜지의 3차원 좌표 정보는 식 (12), (13)과 같은 좌표 변환 계수를 이용하여 그림 12와 같이 구조물 좌표계에서의 3차원 좌표 정보로 변환 될 수 있다.

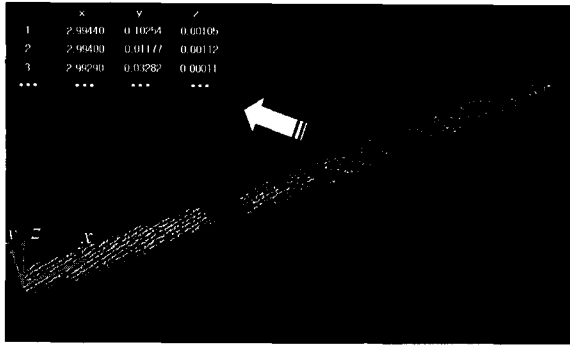


그림 12. 좌표 변환 후 상부 플랜지의 변형 후 3차원 형상 정보

실제 라이더의 정밀도를 확인하고자 휨 변형 전의 웹 및 플랜지를 구조물 좌표계로 변환하고 이때 오차를 알아보았다. 웹의 경우 좌표 변환 후 구조물 좌표계  $y$ 축 방향(거리오차)으로의 좌표 값의 최대와 최소 오차는 84.9 mm, 상부 플랜지의 경우 구조물 좌표계  $z$ 축 방향(수직오차)으로의 좌표 값의 최대와 최소의 오차는 8.1 mm로 나타났다. 50 m 기준 최대 10 mm의 거리오차, 그리고 최대 7 mm의 수평, 수직 오차보다 큰 값을 나타내었음을 알 수 있다.

#### 4.5 변위 계측

본 2점 집중하중을 받는 철골 보의 휨 실험에서는  $L/3$ ,  $2L/3$ 지점에 집중하중( $P$ )을 가력 하였다. 지점 조건과 처짐 곡선 미분 방정식을 이용하면 구간에 따라 식 (14)~(16)과 같은 처짐을 예상할 수 있다.

$$\delta = \frac{P}{6EI}x^3 - \frac{PL^2}{9EI}x, \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{3} \quad (14)$$

$$\delta = \frac{PL}{6EI}x^2 - \frac{PL^2}{6EI}x + \frac{PL^3}{162EI}, \quad \frac{L}{3} \leq x \leq \frac{2L}{3} \quad (15)$$

$$\delta = -\frac{P}{6EI}x^3 + \frac{PL}{2EI}x^2 - \frac{7PL^2}{18EI}x + \frac{PL^3}{18EI}, \quad \frac{2L}{3} \leq x \leq L \quad (16)$$

여기서,

$M$  : 휨 모멘트,  $E$  : 탄성 계수,  $I$  : 단면 2차 모멘트

첫 번째 구간( $0 \sim L/3$ )과 세 번째 구간( $2L/3 \sim L$ )에서는 보의 길이 방향으로 위치( $x$ )에 따른 보의 처짐에 대한 관계식이 3차식으로 표현됨을 알 수 있고, 이에 적절한 최소제곱법을 적용하여야 한다. 마찬가지로

두 번째 구간( $L/3 \sim 2L/3$ )에서는 보의 길이 방향으로 위치( $x$ )에 따른 보의 처짐에 대한 관계식이 2차식으로 표현됨을 알 수 있고, 이에 적절한 최소제곱법을 적용하여야 한다. 그러나 획득되는 좌표의 분포가 라이더의 오차로 인하여 이산화 되어 있기 때문에 구간에 따른 적절한 최소제곱법을 적용할 수가 없었다. 본 연구에서는 식 (17), (18)과 같이 모든 구간에 대하여 보의 처짐에 대한 관계식을 2차식으로 가정하여 최소제곱법을 적용하였다.

$$z = A\xi + e \quad (17)$$

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{4940} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00105 \\ -0.00122 \\ \vdots \\ -0.00190 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{4940}^2 & x_{4940} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.99440^2 & 2.99440 & 1 \\ 2.99400^2 & 2.99400 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.00856^2 & -0.00856 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\xi = \begin{bmatrix} a_f \\ b_f \\ d_f \end{bmatrix}$$

단위 : m

$$D_{flange} : a_{df}x'^2 + b_{df}x' + c_{df}z' + d_{df} = 0 \quad (18)$$

여기서,

$$a_{df} = 0.00617, b_{df} = -0.01827, c_{df} = -1, d_{df} = 0.00067$$

라이더로 획득한 3차원 좌표 정보는 철골 보 이외에도 양 지점까지 포함되어 있다. 따라서 불필요한 3차원 좌표 정보를 제거하고 양 지점을 정확히 구분한 상부플랜지와 웹만을 포함한 철골 보의 형상을 획득하여야 한다. 본 논문에서는 연구의 초기단계로서 변위계측모델에 필요한 상부플랜지와 웹의 3차원 좌표획득에 있어서 인위적인 작업이 필요하고 이때 3차원 좌표 정보를 정확히 대칭으로 제거할 수 없기 때문에 이로 인한 오차의 영향을 받을 수 있다. 보의 지점에 가까울수록 처짐의 변화에 대한 기울기가 증가하기 때문에 오차의 영향이 크게 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 이러한 영향을 배제하기 위하여 본 논문에서는 실험조건을 고려하여 대칭 하중을 받고 단단 지지된 지점조건에서의 최대 처짐은 보의 중앙에서 작용한다는 가정을 적용하였다. 즉, 식 (17)에서 계수  $a, b$ 만을 이용하여 철골 보의 처짐 형상을 유도

하였고, 이때 최대 처짐이 발생하는 위치를 기준으로 양 지점방향으로 L/2만큼 이동하여 지점에 근접한 값을 구하였다. 최대 처짐이 발생하는 곳은 식 (18)을  $x$ 에 대하여 미분하여 구할 수 있다. 6번째 단계에서 최대 처짐이 구조물 좌표계의 원점으로 부터 1.48 m 떨어진 곳에서 발생하였음을 알 수 있었고, 식 (19)~(22)와 같이 철골 보의 중앙(L/2 지점)에서의 최대 처짐 값을 구할 수가 있었다.

3차원 공간에서의 기하학적 특성을 이용하여 벡터를 생성하고 좌표 변환을 하였으며 최소제곱법을 적용하여 그림 13과 같이 변위를 계측 할 수 있었다.

$$\frac{dz}{dx} = 2 \times 0.00617 \times x - 0.01827 = 0, x = 1.48 \text{ m} \quad (19)$$

$$z_{1.48} = 0.00617 \times 1.48^2 - 0.01827 \times 1.48 = -0.013525 \text{ m} \quad (20)$$

$$z_{2.98} = 0.00617 \times 2.98^2 - 0.01827 \times 2.98 = 0.000347 \text{ m} \quad (21)$$

$$z_{center} = z_{2.98} - z_{1.48} = 0.013872 \text{ m} \quad (22)$$

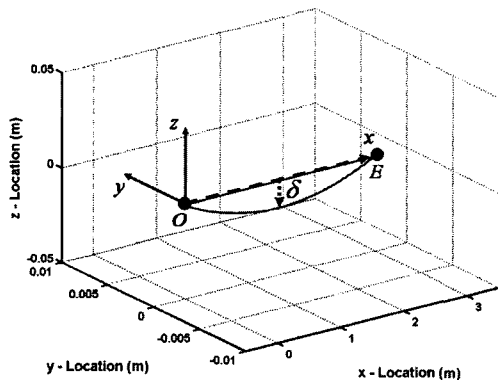


그림 13. 변위 계측

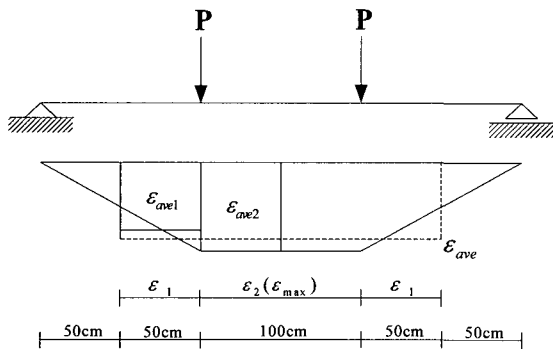


그림 14. 변형률 분포와 평균변형률

## 5. 변위계측모델의 적용성 검증

### 5.1 전기저항식센서를 이용한 변위 계측

전기저항식센서로 측정한 변형률( $\epsilon$ )을 이용하여 보의 처짐( $\delta$ )을 유도 할 수 있다. 재료가 선형으로 탄성이고, Hooke의 법칙을 따른다고 가정하면 보의 처짐 곡선의 기본 미분방정식은 식 (23)과 같이 유도된다.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (23)$$

여기서,

$M$  : 휨 모멘트,  $E$  : 탄성 계수,  $I$  : 단면 2차 모멘트

예를 들면 L/2 지점의 처짐( $\delta_{L/2}$ )은 식 (23)을 중적분한 후 각 지점에서의 경계 조건을 적용시킴으로써 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{L/2} = \frac{23PL^3}{648EI} \quad (24)$$

철골 보의 L/2 지점의 응력( $\sigma_{L/2}$ )은 식 (25)와 같이 변형률( $\epsilon_{L/2}$ )과 하중( $P$ )으로 나타낼 수 있고, 식 (26)와 같이 변형률을 이용하여 작용한 하중을 예상할 수 있다.

$$\sigma_{L/2} = E\epsilon_{L/2} = \frac{M_{L/2}}{Z} = \frac{PL}{3} \frac{1}{Z} \quad (25)$$

$$P = \frac{3ZE\epsilon_{L/2}}{L} \quad (26)$$

여기서,

$Z$  : 단면 계수

식 (26)을 식 (24)에 대입하여 변형률을 이용한 처짐 ( $\delta_{L/2}$ )을 계산할 수 있다.

### 5.2 광변형센서를 이용한 변위 계측

그림 14와 같이 변형률( $\epsilon$ ) 분포와 평균 변형률( $\epsilon_{ave}$ )과의 관계를 나타낼 수 있다. L/2 지점에서의 변형률( $\epsilon_{L/2}$ )과 평균 변형률( $\epsilon_{ave}$ )과의 관계식은 식 (27)~(31)과 같이 유도 할 수 있다. 광변형센서로 측정한 평균 변형률을 이용하여 식 (31)과 같이 L/2 지



점의 변형률( $\epsilon_{L/2}$ )을 구할 수 있으며, 식 (24), (26)을 이용하여 처짐( $\delta_{L/2}$ )을 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{L/2} = \frac{M_{L/2}}{EZ} = \frac{PL}{3} \frac{1}{EZ} = \frac{PL}{3EZ} \quad (27)$$

$$\epsilon_{ave1} = \frac{\int_{L/6}^{L/3} \epsilon}{L/6} = \frac{PL}{4EZ} \quad (28)$$

$$\epsilon_{ave2} = \frac{\int_{L/3}^{L/2} \epsilon}{L/6} = \frac{PL}{3EZ} \quad (29)$$

$$\epsilon_{ave} = \frac{\epsilon_{ave1} + \epsilon_{ave2}}{2} = \frac{7PL}{24EZ} \quad (30)$$

$$\epsilon_{L/2} = \frac{8}{7} \epsilon_{ave} \quad (31)$$

### 5.3 응력 계산

전기저항식센서와 광변형센서로 측정한 변형률을

이용하고, 식 (32)의 응력( $\sigma$ ) - 변형률( $\epsilon$ ) 관계식을 이용하여 철골 보의 L/2 지점의 응력을 계산하였다.

$$\sigma = E\epsilon \quad (32)$$

식 (23)의 처짐 곡선의 기본 미분방정식을 중적분한 후 각 지점에서의 경계 조건을 적용시키면 L/2 지점의 처짐( $\delta_{L/2}$ )을 하중( $P$ )으로 나타낼 수 있다. 라이다 변위계측모델로 구한 처짐을 이용하여 L/2 지점에 작용하는 하중을 예상할 수 있으며, 식 (33)과 같이 응력을 계산할 수 있다.

$$\sigma_{L/2} = \frac{M_{L/2}}{Z} = \frac{PL}{3} \frac{1}{Z} = \frac{216E\delta_{L/2}}{23L^2Z} \quad (33)$$

### 5.4 변위계측모델의 적용성 분석

4장의 내용과 같이 변위계측모델을 이용하여 보의 처짐을 구하였고, 5.1절, 5.2절의 내용과 같이 전기저항식센서, 광변형센서의 변형률을 이용하여 보의 처짐을 구하였다(표 1, 그림 15, 16). LVDT 변위 계측

표 1. 여러 가지 측정 방법을 이용한 보의 처짐

Load step	Measuring techniques	Deflection (mm)				
		L/6	L/3	L/2	2L/3	5L/6
Step 1	LVDT	0.56	0.82	0.97	0.96	0.81
	LiDAR	0.40	0.64	0.72	0.64	0.40
	Erectrical sensor	0.22	0.41	0.54	0.51	0.26
	Fiber optic sensor	0.28	0.49	0.57	0.49	0.28
Step 2	LVDT	1.14	1.68	1.98	1.91	1.53
	LiDAR	0.78	1.26	1.41	1.26	0.79
	Erectrical sensor	0.52	0.89	1.11	1.00	0.55
	Fiber optic sensor	0.46	0.79	0.91	0.79	0.46
Step 3	LVDT	2.32	3.48	4.03	3.82	2.90
	LiDAR	1.47	2.35	2.65	2.36	1.47
	Erectrical sensor	1.20	2.17	2.56	2.25	1.26
	Fiber optic sensor	1.09	1.90	2.18	1.90	1.09
Step 4	LVDT	4.52	7.09	8.01	7.53	5.39
	LiDAR	3.54	5.69	6.41	5.70	3.56
	Erectrical sensor	2.76	5.12	5.84	4.97	2.81
	Fiber optic sensor	2.71	4.71	5.41	4.71	2.71
Step 5	LVDT	6.60	10.54	12.03	11.10	7.65
	LiDAR	5.44	8.72	9.82	8.73	5.46
	Erectrical sensor	4.33	8.19	9.14	7.68	4.29
	Fiber optic sensor	4.42	7.69	8.84	7.69	4.42
Step 6	LVDT	8.65	14.07	16.04	14.64	9.80
	LiDAR	7.69	12.32	13.87	12.33	7.71
	Erectrical sensor	5.90	11.60	12.76	10.63	5.79
	Fiber optic sensor	6.15	10.70	12.31	10.70	6.15

표 2. 여러 가지 측정 방법을 이용한 보의 응력

Load step	Measuring techniques	Location (L/2)		
		Stress (tf/cm <sup>2</sup> )	Stress error (tf/cm <sup>2</sup> )	Stress error/Fy (%)
Step 1	Erectric sensor	0.12	-	-
	LiDAR	0.16	0.04	1.2
	Fiber optic sensor	0.12	0.00	0.0
Step 2	Erectric sensor	0.24	-	-
	LiDAR	0.31	0.07	2.1
	Fiber optic sensor	0.20	-0.04	-1.2
Step 3	Erectric sensor	0.56	-	-
	LiDAR	0.58	0.02	0.6
	Fiber optic sensor	0.48	-0.08	-2.4
Step 4	Erectric sensor	1.28	-	-
	LiDAR	1.40	0.12	3.6
	Fiber optic sensor	1.19	-0.09	-2.7
Step 5	Erectric sensor	2.00	-	-
	LiDAR	2.15	0.15	4.5
	Fiber optic sensor	1.94	-0.06	-1.8
Step 6	Erectric sensor	2.80	-	-
	LiDAR	3.04	0.24	7.3
	Fiber optic sensor	2.70	-0.10	-3.0

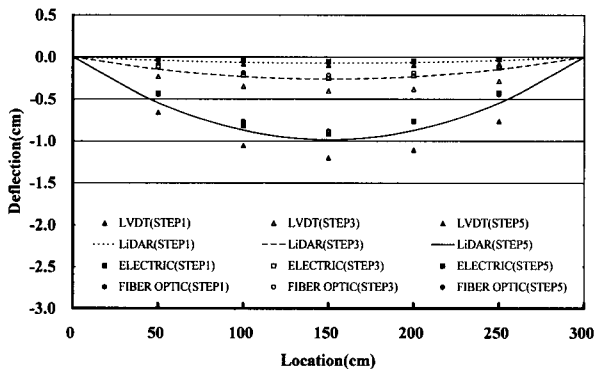


그림 15. 보의 길이 방향 위치에 따른 처짐 분포 (Step 1, 3, 5)

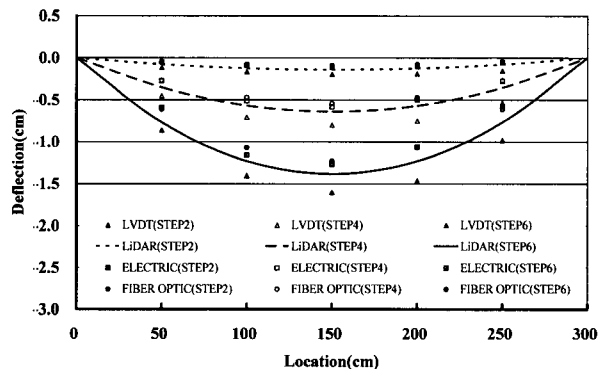


그림 16. 보의 길이 방향 위치에 따른 처짐 분포 (Step 2, 4, 6)

값을 기준으로 라이다 변위계측모델로 계산한 변위 값을 비교해 보면 L/2 지점에서 최대 2.21 mm(Step 5)의 오차를 나타내었다. LVDT 변위 계측 값을 기준으로 전기저항식센서의 변형률을 이용하여 계산한 변위 값을 비교해 보면 L/2 지점에서 최대 3.28 mm(Step 6)의 오차를 나타내었다. 전기저항식센서와 광변형센서의 변형률을 이용하여 계산한 변위 값의 경우에도 LVDT로 계측한 변위 값과 상대적으로 큰 오차를 나타내었는데, 변형률에서 변위를 계산할 때 실험조건을 이론에 적용하는데서 발생하는 오차로 예상되며 실제 구조물에서도 이에 대한 고려가 필요할 것으로 예상된다.

그리고 라이다 변위계측모델을 이용하여 측정된 L/2 지점의 철골 보의 응력을 전기 저항식 센서로 얻은 정량적인 보의 응력 값과 비교한 결과 최대 0.24 tf/cm<sup>2</sup>의 응력 오차를 가졌고, 항복강도 3.3 tf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 오차율은 최대 7.3 %를 나타내었다(표 2).

## 6. 변위계측모델의 활용 방안

본 기법은 영상을 기반으로 하는 모니터링 방법으로, 기하학적 형상 정보만이 획득 가능하다. 따라서 구조물의 손상과 관련한 강도 및 강성의 변화와 관련하여 현재 사용하고 있는 변형률측정 장치와 비교해 볼

때 직접적인 강도 및 강성의 변화 측정에는 무리가 있겠지만, 구조물의 전체적인 거동을 예측하고 이해하는데 도움이 될 것이며 경우에 따라서는 국부적인 위치에서의 데이터 값에 의존하는 변형률측정 장치보다 중요한 구조정보를 제공할 것으로 판단된다. 또한 대상 구조물의 변형이 잘 표현될 수 있는 라이더 장비의 설치 대수 및 설치 위치도 매우 중요한 요소라고 생각된다. 그러나 구조물은 다양한 형상을 가지고 있으며 규모도 또한 다양하므로 이러한 사항을 모두 고려할 때 라이더 설치 대수 및 설치 위치는 매우 다양할 수 있음을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 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 계측 되지만 라이더를 이용하는 경우 건물 두 외벽 면이 교차하는 형성되는 모서리를 기준 벡터로 하여 건물 전체의 변형 모드 또한 계측가능 할 것으로 예상된다.

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 연구에서 개발한 모델이 현실적인 대안이 되리라 예상된다.

라이더를 이용한 변위계측모델에서는 구조물의 변형 형상을 나타내는 영상의 각 점들에 대한 3차원 좌표를 얻을 수 있으므로 각 점의 3차원 좌표를 유효요소해석법의 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 활용가능 할 것으로 예상된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 라이더를 이용하여 철골 보의 변형 형상 및 변위를 계측 하여 안전 및 사용성을 평가할

수 있는 새로운 모델을 제시하였다. 제시된 모델의 적용성을 검증하기 위하여 2점 집중하중을 받는 단순지진된 철골 보의 휨 실험을 하였다. LVDT로 직접 계측한 처짐을 기준으로 전기저항식센서를 이용하여 계측한 변형률, 광변형센서로 계측한 평균 변형률, 그리고 라이더를 이용한 구조물의 변위계측모델을 이용하여 구한 철골 보의 변형을 가지고 각각 처짐 및 응력을 계산하여 비교하였다. 이 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 라이더 변위계측모델을 이용하여 철골 보의 처짐을 계측할 수 있었다.
- (2) 라이더 변위계측모델은 철골 보의 특정 위치의 처짐 이외에도 변형 형상도 구현 할 수 있었다.
- (3) LVDT 측정 처짐 값을 기준으로 제시된 모델을 이용하여 구한 처짐 값을 비교해 보면 각 하중에 대해서 2 mm 내, 외의 오차를 나타내었다.
- (4) 제시된 모델을 이용하여 계측한 L/2 지점의 처짐 값으로부터 계산한 응력 값은 전기저항식센서를 이용하여 계산한 응력 값과 비교하여 항복강도 기준으로 10% 이내의 오차를 나타내었다.
- (5) LVDT로 계측한 변위 값은 구조물의 거동을 직접적으로 반영하기 때문에 사용성, 안전성을 평가하는데 정확한 지표가 될 수 있지만 고층 건물이나, 장스팬 구조물의 경우 직접적인 설치 및 계측이 어렵다는 단점이 있다. 고층건물이나, 장스팬 구조물에 적용할 수 있는 전기저항식센서, 광변형센서, 그리고 라이더 변위계측모델을 이용하여 구조물의 변위를 계측하고 이에 대한 결과 값을 비교, 분석 한 결과 제시된 모델이 전기저항식센서, 광변형센서와 유사한 성능의 신뢰적인 값을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정 연구 개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Ackemann F.(1999). *Airborne laser scanning – present status and future expectation*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 64–67.
- Anton H.(2000). *Elementary Linear Algebra*, John Wiley & Sons, Inc.
- Breuer P., Chmielewski T., Gorski P., Konopka E.(2002). *Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 223–230.
- Celebi M.(2000). *GPS in dynamic monitoring of long-period structures*, Soil Dynamics and Earthquake Eng. 20, pp.477–483.
- Fraser C.S. and Riedel B.(2000). *Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology*, ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing 55, pp. 268–276.
- Olaszek P.(1999). *Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method*, Measurement 25, pp. 227–236.
- Tamura Y., Matsui M., Pagnini L.C., Ishibashi R. and Yoshida A.(2002). *Measurement of Wind-induced response of buildings using RTK-GPS*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 1783–1793.
- Wahbeh A.M., Caffrey J.P. and Masri S.F.(2003). *A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibration systems*, Smart Mater. Struct. 12, pp. 785–794.

© 논문접수일 : 2006년 05월 02일

© 심사의뢰일 : 2006년 05월 15일

© 심사완료일 : 2006년 08월 10일