

지상 LiDAR를 이용한 철골보의 안전 및 사용성 모니터링을 위한 변위 계측기법

Displacement Measuring Method using Terrestrial LiDAR for Safety and Serviceability Monitoring of Steel Beams

이 홍 민*
Lee, Hong Min

박 효 선**
Park, Hyo Seon

이 임 평***
Lee, Im Pyeong

ABSTRACT

To monitor the safety and serviceability of a structures, structural responses including displacements due to various design and unexpected loadings must be measured. The maximum displacement and its distributions of a structure can be used as a direct assessment index on its stiffness. For this reason, there have been diversely studied on measuring of the maximum displacement of a structure. However, there is no practical method for measuring displacement of a structure. Therefore, in this paper, new displacement measuring method is developed and accuracy of LiDAR is examined in detail for development of a new method for measuring displacement of a structure.

Keywords : Health monitoring, LiDAR(Light Detection and Ranging), Displacement measuring, Safety Evaluation

1. 서 론

최근 건축, 토목 구조물은 고층화, 대형화됨으로 인해 이에 적절한 안전성을 평가할 수 있는 구조물 모니터링 장치 및 기법이 절실히 요구되고 있는 추세이다. 고층건물이나 장대 교량 등과 같은 구조물의 경우 시공 후 시간이 경과하면서 피로가 누적되고 재해 등으로 인해 역학적 성능이 저하되어 위험요소가 내재될 수 있기 때문에 사고 예방을 위해서 일정한 주기로 안전성을 진단할 필요가 있다. 이에, 구조물 안전성 진단을 위하여 구조물의 거동을 계측할 수 있는 장치들과 방법들이 개발되어 이용되고 있다. 그러나 구조물의 안전성 진단을 위해 사용되고 있는 종래의 구조물 거동 계측 장비들과 그 장비를 이용한 구조물 안전성 진단방법들은 구조물 전체에 대한 거동측정이 불가능하거나 또는 거동 량이 미세한 경우 정밀도가 현저히 떨어지기 때문에 구조물의 안전성을 정밀하게 진단하는데 어려움이 있다. 최근에는 GPS를 이용한 구조 거동 모니터링 기법, 디지털 사진을 이용한 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법이 신뢰성 있는 정밀도를 가지고 연구 되어지고 있다. GPS를 이용한 구조 거동 모니터링 기법은 Hyzak(1997)⁽¹⁾, Teague(1995)⁽²⁾, Guo and Ge(1997)⁽³⁾, Kondo and Cannon(1995)⁽⁴⁾, Lovse(1995)⁽⁵⁾, Hudnut and Behr(1998)⁽⁶⁾에 의해서 GPS를 이용한 고층 빌딩, 다리 등의 실시간 변위 측정 방법이 소개되고 있으며, 실험적인 단계로 실용성을 테스트 해 왔다.

* 정희원, 연세대학교 건축도시공학부 석사과정

** 정희원, 연세대학교 건축도시공학부 부교수

*** 서울시립대학교 지적정보학과 조교수

이후 단순한 구조물의 변위 계측을 벗어나 대형 구조물의 적용성을 평가하기 위한 연구가 시작되었다. 미국에서 Celebi(2002)⁽⁷⁾가 GPS의 적용 가능성을 보이기 위하여 모델테스트와 풍하중을 받고 있는 44층 고층 빌딩을 모니터링 하고 스펙트럼을 분석한 후, GPS에 의한 고층 건물의 구조 거동에 관한 적용 가능성과 전망에 대하여 정리하였다. Tamura (2002)⁽⁸⁾는 실시간 이동 측위 기법으로 정확도를 시험하고, 풍하중에 반응하는 건물을 계측하였다. 모델 시험에 의해 변위가 2cm이상, 주파수가 2Hz이상일때 실제 변위와 유사함을 보여주었다. 지금까지의 다양한 GPS관련 연구에서 계측된 변위는 수평방향으로 $\pm 1\text{cm}$, 수직방향으로 $\pm 2\text{cm}$ 로 정밀도를 평가하고 있다. 디지털 사진기를 이용한 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법은 렌즈를 통해 사진기에 투영된 광학상의 세기에 비례하여 발생하는 전하의 영상소자 디지털신호를 이용함으로써 물체의 위치를 결정하는 기법으로 일반적으로 하나의 탐측요소가 $10\mu\text{m}$ 보다 작으며 제조과정에서의 정확도는 $1/10\mu\text{m}$ 정도이다. Olaszek(1999)⁽⁹⁾는 망원렌즈가 장착된 디지털 CCD(Charge Coupled Device) 사진기를 사용하여 특정위치의 변위를 측정하였다. 변위 측정의 정밀도에 영향을 주는 다양한 요인을 정리하였고, 5Hz 이내의 주파수범위 이내에서 정적, 동적으로 0.1mm-1.0mm의 정밀도를 갖는 변위를 측정하였다. Fraser and Riedel(2000)⁽¹⁰⁾은 3대의 디지털 CCD 사진기를 사용하여 사진측량 삼각분할과정으로 온도에 따른 강재보의 변위를 측정하였다. 1200°C-0°C의 온도변화에서 0.7mm-1.3mm의 정밀도를 갖는 변위를 측정하였다. Wahbeh (2003)⁽¹¹⁾는 디지털 사진기와 2개의 LEDs(light emitting diodes) 표적을 사용하여 장스팬 교량의 특정 부분의 변위를 측정하였다. 디지털 사진기로 획득한 영상으로부터 필요로하는 정보를 추출하기 위해 대형 구조물에서 중요한 작은 주파수를 추출할 수 있는 적분 알고리즘을 사용하였고, 다른 연구 결과와 비슷한 결과(변위 1.5-2.2inch, 1차모드 0.23Hz, 2차모드 0.36Hz)를 도출해 내었다. 이와 같이 연구된 GPS를 이용한 구조 거동 모니터링 기법, 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법은 복잡한 3차원 변형을 갖는 구조물에 특정한 위치의 변위를 직접 실시간으로 측정할 수 있는, 경제적이고, 완고한 시스템으로 이끌수 있는 잠재력을 갖고 있다고 예상된다. 그러나 GPS를 이용한 구조 거동 모니터링 기법의 경우 수평방향으로 $\pm 1\text{cm}$, 수직방향으로 $\pm 2\text{cm}$ 의 정밀도를 갖고 있기 때문에 상대적으로 예민한 구조 거동을 보이는 구조물의 측정이 어려우며, Wieser and Brunner(2002)⁽¹²⁾에 의하면 위성과 측정 대상물과의 전파측정에서 케이블 등과 같은 전기 시설의 영향으로 회절을 일으켜 크게는 수 센티미터 이상의 오차를 일으킬수도 있기 때문에 일부 사회 기반 시설에 대한 모니터링에 제한되는 단점도 있다. 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법의 경우 기법장치의 특성상 대기의 조건, 비, 먼지, 명암도 등과 같은 환경의 영향을 받고, 어떤 특정 위치에 대한 변위측정에 국한 되어야 하는 문제가 있다. ALS(Airborn Laser Scanning)시스템이라고도 불리는 LiDAR(Light Detection And Ranging, 라이다)는 상대적으로 환경의 영향을 크게 받지 않으며, 특정 위치가 아닌 측정 구조물 전체의 형상을 획득할 수 있다는 장점이 있다. 또한 획득되는 데이터의 특성상 데이터 처리의 자동화가 비교적 쉽다(Ackermann, 1999)⁽¹³⁾. 이에 본 연구에서는 라이다를 이용한 구조물의 변위 계측 모델을 연구 하였고, 보의 휨 실험을 통하여 정확도를 분석하였다.

2. 라이다의 구성과 특징

2.1 라이다의 측정 원리

라이다 시스템은 레이저(LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)를 이용하여 대상물의 3차원 정보를 관측하는 것으로서 데이터 취득 및 처리가 완전 디지털 방식으로 이루어지므로 계측의 경제성과 효율성이 매우 높다. 라이다를 이용한 물체의 3차원 좌표 추출 원리는 그림 1과 같다. 일정한 거리로부터 물체에 레이저 펄스를 발산하여 되돌아오는데 걸리는 시간을 측정하고 빛의 속도를 계산하여 거리를 계산한다. 이렇게 수개의 레이저 펄스를 발산하여 물체와의 떨어진 거리를 이용하여 라이다 장치로부터

물체의 상대좌표를 획득 할 수 있다.

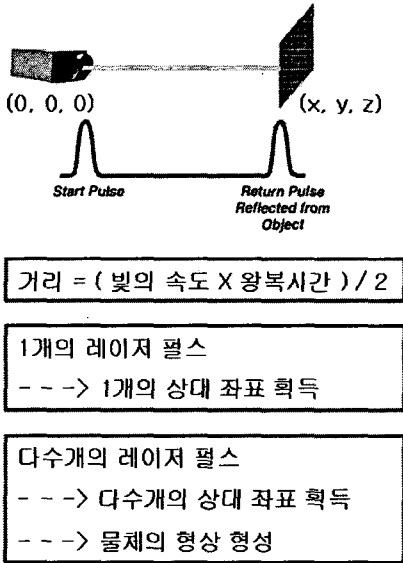


그림 1 라이다를 이용한 물체의 3차원 좌표 추출 원리 및 출력 영상

2.2 지상 라이다

본 연구에서는 Optech사의 ILRIS-3D 지상 라이다를 사용하였고, 이 모델의 주요 규격은 그림 2와 같다. 이 지상 라이다는 개개의 레이저펄스가 표적에 반사될 때 이루는 레이저 스폿의 크기와 간격이 상당히 작고 또한 데이터 샘플링 속도가 빠르기 때문에 고속 정밀 샘플링을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 이 장비를 이용하여 측정하고자 하는 대상 물체에 레이저 펄스를 발진하고, 반사되어 되돌아오는 시간과 거리를 자동으로 계산하여 물체의 3차원 좌표를 얻게 된다. ILRIS-3D 지상 라이다를 사용하여 대상 물체의 3차원 좌표를 획득할 경우, 초기에 설정한 임의의 각을 가지고 레이저 펄스가 발산하게 된다. 이 각은 사용자가 모니터상에서 레이저 스폿간격으로 대신 지정할 수 있다. 측정 거리가 증가함에 따라 획득되는 측정 대상의 레이저 스폿간격은 일정하게 증가하게 된다. 발진 위치를 기준으로 측정 대상 거리 5 m에서 최소 0.13 mm 간격, 최대 13.3 mm 간격으로 좌표 획득이 가능하며, 거리 500 m에서 최소 13 mm간격, 최대 1330 mm 간격으로 좌표 획득이 가능하다.

Maximum range	≤350m(4% Target Ref.)	
Target registration accuracy	4mm	
Modeling accuracy	3mm	
Spot spacing	0.026R - 2.6R mm	
Spot position accuracy	X-Y @50m	±7mm
	X-Y @100m	±10mm
	Z @50m	±10mm
	Z @100m	±10mm
Spot size	29mm@100m(0.17R+ 12)	
Field of view	0° - 40°	
Data sample rate	2,000 point/sec	

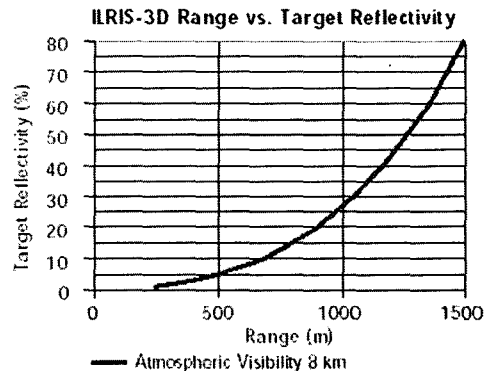


그림 2 지상 라이다(모델명: ILRIS-3D) 규격

3. 라이다를 이용한 구조물의 변위 계측 모델

라이다를 이용하여 수많은 3차원 좌표를 획득할 때 라이다 장치의 성능에 따라 일부 데이터에서 그림 2와 같은 정밀도로 오차가 발생한다. 이러한 오차를 줄이면서 구조물의 일정한 구조 형상을 얻기 위해서는 다양한 3차원 공간상의 이해가 필요하다. 라이다를 이용하여 획득되는 형상정보는 장비의 측정 오차를 가지고 있으므로 각각의 3차원 공간상의 관계를 구할 경우 연립방정식이 불능이 되는 것이 일반적인 경우이다. 그러므로 정밀한 변위 계측에 적절한 근사화가 필요하다. 본 연구에서는 최소 제곱 근사 이론을 이용하여 3차원 좌표의 값을 근사화 하였고, 3차원 공간상의 기하학적인 관계를 이용하여 변위 계측 모델을 개발 하였다.

3.1 최소 제곱 근사 이론(least squares approximation theory)

최소 제곱 근사 이론에 의하여 최소 제곱해를 구한다는 것은 수집된 점들로부터 n 차 다항식까지 거리의 제곱의 합이 최소가 되는 n 차 다항식을 구하는 방법이다. n 개의 미지수의 m 개의 방정식을 갖는 연립 방정식 $A\xi = b$ 가 주어졌을 때 $\|A\xi - b\|$ 를 최소화 할 수 있는 벡터 ξ 를 구할 수 있다. 예를 들어 설명하면 구하고자 하는 1차 다항식의 일반식은 다음 식 (1)과 같다.

$$y = x\xi + e \quad (1)$$

최소 제곱해를 구하기 위해서 m 개의 좌표 데이터를 이용할 경우, 식 (1)은 식 (2)와 같이 오차 e 를 수반하는 식으로 표현할 수 있고, 최소 제곱 근사 이론에 의하여 식 (2)로부터 식 (4)와 같이 추정치 ξ^* 를 계산할 수 있다.

$$u = A\xi + e \quad (2)$$

$$u = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_m & 1 \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix}$$

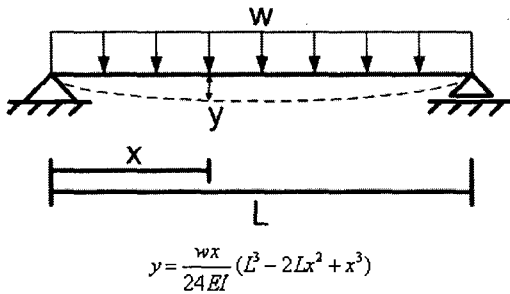
$$A^T A \xi^* = A^T u \quad (3)$$

$$\xi^* = (A^T A)^{-1} A^T u \quad (4)$$

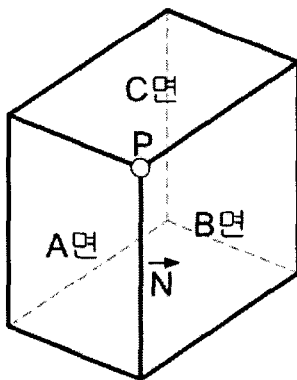
3.2 변위 계측 모델

라이다를 이용하여 수많은 3차원 좌표를 획득하고, 이를 이용하여 구조물의 구조 정보를 얻기 위해서는 수학적인 기하학적 특성과 3차원 공간의 이해가 필요하다. 구조물을 구성하는 구조체는 하중의 양상, 건물의 형태에 따라 수평변위, 수직변위, 비틀림 등의 구조적 특성을 갖는 변형이 발생한다. 이런 특성들은 재하되는 하중 양상, 하중 위치와 관련해 n 차의 다항식으로 표현될 수 있고, 각각의 특성에 맞는 차수의 다항식을 위

3.1절의 내용과 같이 최소 제곱 근사 이론을 이용하여 구할 수 있다. 3차원 공간상에서 기하학적 특성 및 3차원 공간의 이해를 이용하여 필요로 하는 부분의 좌표 값을 획득할 수 있다. 예를들면 등분포 하중을 받는 단순보의 경우 길이 방향으로의 값에 대한 수직변위 값은 4차의 식으로 표현됨을 예상 할 수 있고, 획득된 좌표 점들로부터 최소 제곱 근사 이론을 적용하여 필요로 하는 부분의 이동한 좌표를 획득할 수 있다. 또한, 공간상의 직육면체에서 면 A, B, C의 평면의 방정식을 이용하여 꼭지점 P를 구할 수 있다(그림 3). 3차원 공간에서의 기하학적 특성과 최소 제곱 근사 이론을 적용하여 그림 4와 같은 변위 계측 모델을 구성할 수 있다.



등분포 하중을 받는 단순보



직육면체

그림 3 구조물의 기하학적 특성

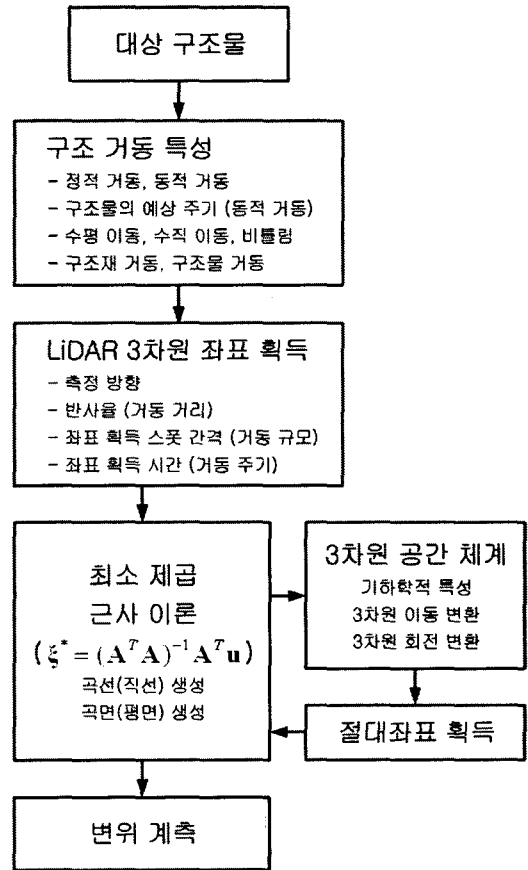


그림 4 변위 계측 모델

4. 실험

4.1 실험 개요

본 연구에서 기본적으로 최소 제곱 근사 이론 및 구조물의 3차원 공간상에서의 특성을 활용하여 필요로 하는 구조정보를 획득할 수 있는 변위 계측 모델을 개발하였다. 본 장에서는 첩골보의 휨 실험을 통하여 얻은 정량적인 보의 처짐 값과, 라이다 이용 변위 계측 모델을 적용한 처짐 값을 비교하여 신뢰성을 확인하였다.

실험에 사용된 보는 1점 가력을 받는 단순 지지된 철골보이며, 횡 좌굴 없이 강축 방향으로 휨 수 있도록 실험체(H-200×200×8/12, SM490, $F_y=3.3\text{tf/cm}^2$)를 설계 하였다. 철골보의 처짐 및 변형률을 측정하기 위하여 보의 하부에 LVDT 및 Point Sensor를 설치하였다. 라이더 측정 시간을 고려하여, 일정한 처짐 간격을 기준으로 변위 제어 가력을 하였으며, 부재의 항복 이후까지 측정 하였다. 라이더를 이용한 실험체의 처짐 형상 획득은 실험체에서 약 7m 거리를 두고 측정하였으며, 보의 웨브 및 플랜지가 모두 측정 되도록 일정한 경사를 두었다.

4.2 실험체 및 LVDT 설치

그림 7과 같이 실험체는 1점 가력을 받는 단순 지지된 철골 보이며, 횡 좌굴 없이 강축 방향으로 휨 수 있도록 설치하였고, 일정 간격으로(L/3, L/2, 2L/3) 보의 정량적인 처짐 값을 알기 위해 LVDT를 설치하였다.

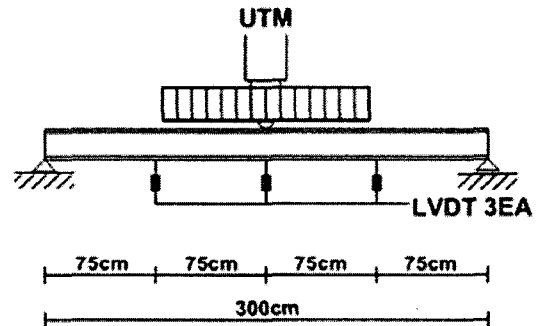
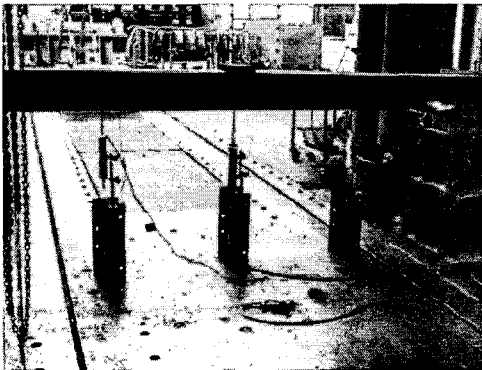
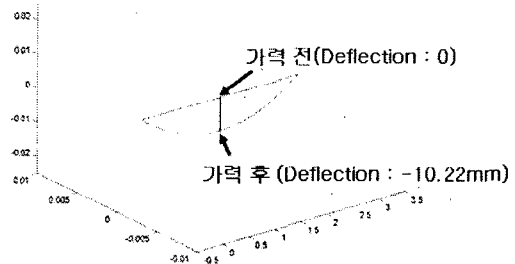
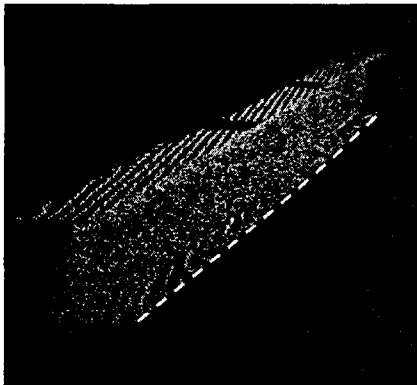


그림 5 실험체와 LVDT 설치

4.3 라이더를 이용한 3차원 좌표 획득

거리 7m에서 4mm의 레이저 스폿 간격으로 보의 처짐을 단계별로 측정 하였다. 라이더 장치에 의해 획득된 데이터는 그림 6과 같이 ILRIS-3D 소프트웨어 상에서 데이터의 상태를 확인한 후 텍스트 데이터로 전환하고, 변위 계측 모델을 Matlab을 이용하여 필요로 하는 변위를 측정 하였다.



$$\xi^* = (A^T A)^{-1} A^T Y$$

EX) LVDT 처짐 12mm, 레이저 스폿 간격 4mm

그림 6 라이더 획득 데이터 영상과 Matlab을 이용한 변위 측정

4.4 정밀도 분석

LVDT로 측정된 처짐 값과 라이다 변위 계측 모델을 적용한 처짐 값은 표 4.1과 같다. 정확도를 분석한 결과 모든 처짐 값에서 2mm 이내의 오차를 나타내었고, LVDT에 의해 측정된 처짐 값 보다 작게 측정 되었다. 그림 7은 L/3, L/2, 2L/3 지점에서 LVDT로 측정 유추한 처짐 곡선과, 라이다 변위 계측 모델을 적용한 처짐 곡선의 그래프를 비교한 것이다. 그림 8은 8mm, 12mm, 16mm, 20mm, 24mm 처짐 단계별로 정확도를 나타낸 것이다.

표 4.1 LVDT, LiDAR 변위 계측 모델 변위 측정 값, 정확도

DEFLECTION		8 mm	12 mm	16 mm	20 mm	24 mm
LVDT LOCATION						
L/2 지점	LVDT(mm)	7.94	11.84	15.90	19.83	23.84
	LiDAR(mm)	7.07	10.22	14.17	18.11	22.63
ACCURACY(mm)		0.87	1.62	1.73	1.72	1.21

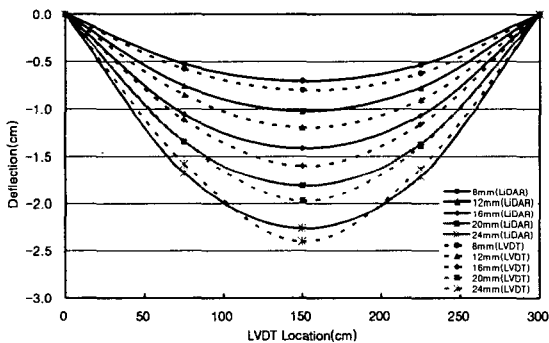


그림 7 라이다 모델, LVDT 처짐 곡선 비교

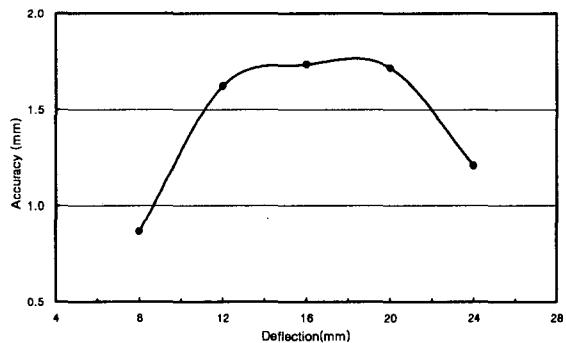


그림 8 처짐에 따른 변위 계측 모델의 정확도

5 결론

라이다를 이용한 구조물의 안전성 평가를 위한 초기 연구로 본 논문에서는 구조물의 변위 측정을 위해서 지상 라이다 장치를 도입하였고, 최소 제곱 근사 이론과 3차원 공간상의 기하학적 특성을 이용하여 변위 계측 모델을 개발 하였다. 보의 휨 실험을 통하여 변위 계측 모델의 정확도를 분석하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 라이다 변위 계측 모델을 이용하여 구조물의 처짐 양상을 구현 할 수 있었다.
- (2) LVDT 변위 측정 값과 라이다 변위 계측 모델을 적용한 변위 측정 값을 비교한 결과 2mm 이내의 정확도를 나타내었다.
- (3) 8mm 이상의 보의 처짐에 대해서 변위 측정을 실시한 결과, 보가 처지는 정도(8mm, 12mm, 16mm, 20mm, 24mm)에 따른 변위 계측 모델의 정확도는 관계가 없었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Hyzak M., Leach M., Duff K., "Practical application of GPS to bridge deformation monitoring", Permanent Committee Meeting and Symp., International Federation of Surveyors (FIG), May 1997.
2. Teague E.H., How J.P., Lawson L.G., Parkinson B.W., "GPS as a structural deformation sensor", Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Baltimore, MD, August 1995.
3. Guo J., Ge S., "Research on displacement and frequency of tall building under wind loading using GPS", ION Conference, Kansas City, MO, September 1997.
4. Kondo H., Cannon M.E., "Real-time landslide detection system using precise carrier phase GPS", ION GPS95 Conference, The Institute of Navigation, Palm Springs, CA, September 1995.
5. Lovse J.W., Teskey W.F., Lachapelle G., Cannon M.E., "Dynamic deformation monitoring of a tall structure using GPS technology", Journal of Surveying Engineering, ASCE. 1995.
6. Hudnut K.W., Behr J.A., "Continuous GPS monitoring of structural deformation at Pacoima Dam", California. Seismol Res Lett 1998;69(4):299308.
7. Celebi M., "GPS in dynamic monitoring of long-period structures", Soil Dynamics and Earthquake Eng. 20, pp.477-483, 2000.
8. Tamura Y., Matsui M., Pagnini L.C., Ishibashi R., Yoshida A., "Measurement of Wind-induced response of buildings using RTK-GPS", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, pp.1783-1793, 2002.
9. Olaszek P., "Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method", Measurement 25, pp.227-236, 1999.
10. Fraser C.S., Riedel B., "Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology", ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing 55, pp.268-276, 2000.
11. Wahbeh A.M., Caffrey J.P., and Masri S.F., "A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibration systems", Smart Mater. Struct. 12, pp.785-794, 2003.
12. Wieser A., Brunner F.K., "Analysis of bridge deformation using continuous GPS measurements" Proc.INGEO(Bratislava. Nov 2002)
13. Ackemann, F., "Airborne laser scanning-present status and future expectation", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp.64-67, 1999.