

라이다를 이용한 고층 건물의 변위 계측 기법에 관한 연구

A Study on the Displacement Measuring Method of High-rise Buildings using LiDAR

이 홍 민* · 박 효 선**

Lee, Hong-Min · Park, Hyo-Seon

ABSTRACT

Structural health monitoring is concerned with the safety and serviceability of the users of structures, especially for the case of building structures and infrastructures. When considering the safety of a structure, the maximum stress in a member due to live load, earthquake, wind, or other unexpected loadings must be checked not to exceed the stress specified in a code. It will not fail at yield, excessively large displacements will deteriorate the serviceability of a structure. To guarantee the safety and serviceability of structures, the maximum displacement in a structures must be monitored because actual displacement is a direct assessment index on its stiffness. However, no practical method has been reported to monitor the displacement, especially for the case of displacement of high-rise buildings because of not to easy accessible. In this paper, it is studied displacement measuring method of high-rise buildings using LiDAR. The method is evaluated by analyzing accuracy of measured displacements for existing building.

Keywords : LiDAR system, Vision-based monitoring, Displacement measurement, High-rise building

1. 서 론

구조해석 시 모델링에 이용된 가정, 설계 도면과 시공의 차이, 작용 하중의 변화 등의 다양한 이유에 의하여 시공된 구조물의 이러한 구조 반응들은 설계 시 평가된 수준과는 현실적으로 다르다. 또한 시공 후 시간이 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 모니터링 할 필요가 있다.

구조물 모니터링은 단위 부재 또는 접합부의 구조 반응 계측기법을 이용한 부재 레벨 모니터링과 구조물 전체의 수평변위와 진동수준 등을 계측하여 안전성과 사용성을 평가하는 구조물 레벨 모니터링으로 구분할 수 있다. 부재 레벨 모니터링은 주로 전기저항식 센서, 광변형 센서 등의 센서를 이용하여 변형률을 계측하여 부재의 작용 용력을 평가하고 이를 기준에 따라 계산된 설계 강도 또는 허용 용력과 비교하여 부재의 안전성을 모니터링 한다. 구조물 레벨 모니터링 기법은 주로 GPS와 가속도계를 이용하여 구조물 전체의 강성

* 정희원 · 연세대학교 건축도시공학부 박사과정 E-mail: idislee@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 건축도시공학부 부교수 E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

을 평가 할 수 있는 정적 변위와 동적 변위 그리고 가속도 수준을 측정하여 구조물 전체의 안전성과 사용성을 모니터링 한다. 가속도계를 이용하는 경우 구조물의 사용성 평가에 사용되는 가속도 수준은 매우 정밀하게 측정이 가능하지만 구조물의 변위 측정은 수치적분에 의한 오류와 변위 성분 중 정적 성분의 측정이 어려운 단점을 가지고 있다. 그리고 최근 연구되는 GPS를 이용하는 경우 가속도계와는 반대로 구조물의 변위 이력은 측정이 가능하지만 최대 10 Hz로 데이터를 수신하기 때문에 미분하여 가속도 수준을 평가하는 경우 최대값을 측정할 수 없다는 단점과 현재까지 수평방향으로 $\pm 1\text{ cm}$ 그리고 수직방향으로 $\pm 2\text{ cm}$ 정도의 정밀도에 한계를 가지고 있다(Celebi, 2000; Tamura, 2002).

최근 GIS 분야에서 사용되는 ALS(Airborn Laser Scanning)시스템이라고도 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 있는 장점이 있다(Ackermann, 1999). 본 연구에서는 라이다를 이용하여 고층 건물의 수평 변위 측정 기법을 제시하고 기법의 적용성을 실험을 통하여 검증하고자 한다. 제시된 기법의 적용성을 알아보기 위하여 현재 존재하고 있는 5층 건물의 특정 위치의 변위 측정에 대한 정밀도를 분석하였다.

2. 라이다의 구성과 특징

라이다 시스템은 레이저를 이용하여 대상물의 3차원 좌표정보를 관측하는 것으로서 데이터 취득 및 처리가 디지털 방식으로 이루어진다. 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 거리와 레이저 펄스의 발산하는 각의 측정으로 라이다를 기준한 물체의 상대 3차원 좌표를 획득 할 수 있다. 본 연구에서 사용된 지상 라이다의 규격은 표 1과 같이 350 m 이내에서 물체의 반사율이 4 % 이상이면 3차원 좌표 정보 획득이 가능하며 레이저 스폿의 간격 및 크기는 거리에 비례한다. 획득되는 3차원 좌표는 측정 방향의 수평 및 수직 방향 그리고 거리 방향으로 오차가 발생한다. 라이다의 시야는 측정방향의 수평, 수직 방향으로 40° ($\pm 20^\circ$)이다. 그리고 1초당 2000포인트의 좌표 데이터 획득이 가능하다. 그림 2는 라이다를 이용하여 구조물의 3차원 좌표정보를 획득한 영상이다.

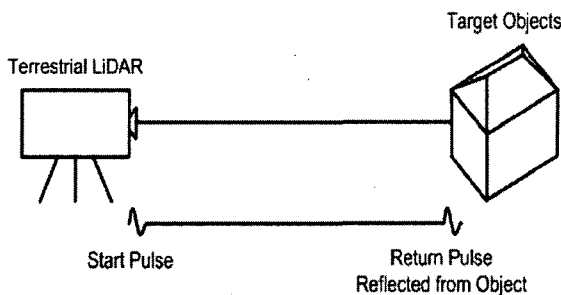


그림 1. 라이다를 이용한 3차원 좌표 추출 원리



그림 2. 라이다로 획득한 3차원 좌표영상

표 1. 지상 라이이다 규격

Maximum range	$\leq 350\ m$ (4 % Target Reflectivity)
Spot spacing	0.026R - 2.6R mm
Spot size	15 mm@50 m, 20 mm@100 m
Distance accuracy	$\pm 10\ mm@50\ m$, $\pm 10\ mm@100\ m$
Position accuracy	$\pm 7\ mm@50\ m$, $\pm 10\ mm@100\ m$
Field of view	$40^\circ \times 40^\circ$ ($\pm 20^\circ$)
Data sample rate	2,000 point/sec

3. 라이이다를 이용한 구조물의 변위 계측 기법

라이이다를 이용하여 획득된 대상 구조물의 3차원 좌표는 측정 방향에 대해서 표 1과 같이 수평 및 수직 오차 그리고 거리 오차를 가질 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 획득된 형상 좌표에 대한 적절한 데이터 처리 기법이 필요하고 계측하고자 하는 구조 반응을 얻기 위해서는 3차원 상의 구조물 좌표계와 라이이다의 좌표계의 관계 정의가 필요하다. 본 연구에서는 최소 제곱 근사 이론을 이용하여 3차원 좌표 값을 근사화하고 3차원 공간상의 기하학적인 관계를 이용하여 고층 건물의 변위 계측 기법을 연구하였다. 변위 계측 기법은 i) 라이이다를 이용한 형상 정보 획득, ii) 최소 제곱 근사 이론을 적용한 기준 벡터 생성, iii) 기준 벡터를 이용한 라이이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의, 그리고 iv) 구조물 좌표계에서의 변위 계산의 4 가지 부분으로 구성되며 각각의 내용은 다음과 같다.

3.1 라이이다를 이용한 형상 정보 획득

구조물을 구성하는 구조재는 선, 면, 입체 등의 기하학적 형상으로 정의 될 수 있고 이러한 형상을 이용하여 3차원 공간상에서 필요한 구조 반응을 계측할 수 있다. 라이이다를 이용하여 구조물의 형상 정보를 획득할 경우에 구조 반응의 계측이 가능하도록 구조물의 기하학적인 형태, 구조적인 거동 등의 특성을 고려하여 측정거리, 측정 방향, 좌표 획득 및 레이저 스폿 간격 등을 사전에 계획할 필요가 있다. 그림 3은 고층 건물 최상층의 변위 계측을 위해서 구조물의 기하학적 특성(Plane_A, B, C)을 이용한 특정 점(P')에 대한 3차원 좌표 정보를 얻을 수 있는 방법을 개념적으로 나타낸다.

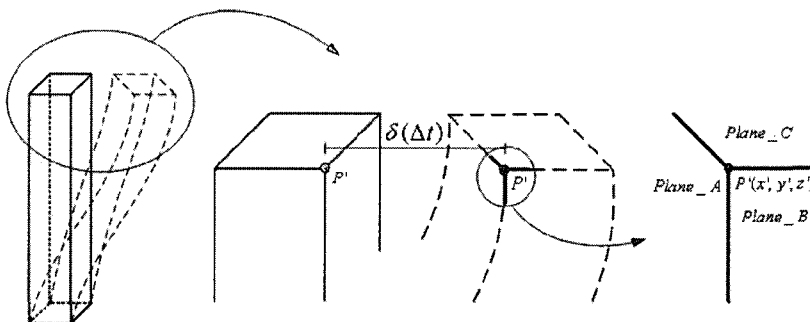


그림 3. 고층 건물의 변위 계측을 위한 개념

3.2 최소 제곱 근사 이론을 적용한 기준 벡터 생성

구조물의 변위를 예측하기 위해서는 라이다를 기준으로 획득한 3차원 좌표계($x'y'z'$)를 변위 예측을 위한 3차원 좌표계(xyz)로 변환을 해야 한다. 좌표 변환을 위해서는 변위 예측을 위한 좌표계와 라이다를 기준으로 하는 좌표계의 관계를 정의할 수 있는 기준 벡터가 필요하고 이것은 라이다 좌표계에서 구조물의 형상을 이용하여 구할 수 있다. 기준 벡터 형성을 위한 면의 방정식(그림 3. $Plane_{A,B}$)을 구성하기 위해서 최소 제곱 근사 이론을 적용한다. 최소 제곱 근사 이론은 실험 등을 통하여 예측된 데이터 간의 상관관계를 정의할 수 있는 함수를 결정하는 근사화기법이다(H. Anton, 2000). 일반적으로 근사화 과정은 우선 데이터의 특성이 반영된 n 차 다항식 등의 함수를 가정하게 되며 가정된 함수의 값과 직접 예측된 데이터 값과의 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 함수의 계수를 결정하게 된다. $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ 과 같이 예측된 m 개 데이터를 1차 다항식을 이용하여 근사화 하는 경우를 예를 들어 설명하겠다.

$$y = ax + b \tag{1}$$

1차 다항식의 일반식은 식 (1)과 같이 표현 될 수 있다. 여기서 x 와 y 는 예측된 데이터의 각 좌표축에 대한 좌표 값을 의미하고 a 와 b 는 m 개의 데이터와 최소 제곱 근사 이론을 이용하여 결정하는 근사 함수의 계수들이다. m 개의 예측된 데이터를 식 (1)의 함수로 근사화 하면 각 데이터들은 e_1, e_2, \dots, e_m 과 같은 오차를 가지게 되며 이를 일반식으로 나타내면 다음과 같다.

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

그리고 이를 매트릭스-벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\boldsymbol{\xi} + \mathbf{e} \tag{3}$$

그러므로 오차 벡터는

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\xi} \tag{4}$$

로 표현되며 미지수인 $\boldsymbol{\xi}$ 벡터는 \mathbf{e} 벡터 요소의 제곱의 합을 최소화하는 과정에서 다음과 같이 계산된다.

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

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

3.3 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의

기준 벡터는 라이다로부터 획득된 영상에서 각 점까지의 3차원 거리를 나타내는 좌표값 x', y', z' 에 의하여 생성되므로 그림 4와 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 변위 계측에 직접 이용될 수 없다. 라이다 영상에서의 상대 이동량을 변위 계측을 위한 구조물 기준 상대 이동량으로 변환하기 위해서는 그림 4와 같이 구조물의 변위 계측을 고려한 구조물 좌표계가 정의 되어야 한다. 이러한 두 좌표계 간의 관계는 앞에서 생성된 기준 벡터를 이용하여 구하게 된다. 구조물의 변위는 두 좌표계간의 관계를 이용하여 구조물 좌표계에의 변형된 영상으로 변환하여 계측하게 된다.

3.4 구조물 좌표계에서의 변위 계산

구조물의 변위 계산은 변형 전 좌표 변환 계수 설정, 변형 후 초기 기준 좌표의 계측, 변형 후 이동 좌표의 계측, 변형 전 초기 기준 좌표와 변형 후 이동 좌표를 비교한 변위 계측의 4 단계로 나눌 수 있다.

좌표 변환 계수는 구조물의 형상을 이용하여 계산되기 때문에 구조물에서 변형이 발생하였을 경우 좌표 변환 계수는 변하게 되며 이때 계측된 변위는 의미가 없어진다. 그래서 건물 완공 초기에 측정하고자 하는 구조물의 좌표를 반복적으로 획득하고 신뢰성 있는 좌표 변환 계수를 설정한다. 그리고 이때 초기 기준이 될 수 있는 기준 좌표를 계측한다. 그 다음으로 변위 계측을 위한 임의의 시점에서 변형된 구조물에 대한 3차원 형상정보를 라이다를 통하여 획득하고, 초기에 설정한 좌표 변환 계수를 이용하여 변위 계측의 기준이 되는 구조물의 3차원 좌표계로 변환한다. 이렇게 변환된 좌표계에서 최소 제곱 근사 이론을 이용한 면의 방정식을 생성하고 기하학적 관계를 이용하여 변형 후 이동 좌표를 계측할 수 있다. 변형 전 초기 기준 좌표와 변형 후 이동 좌표를 비교하여 실제 구조물의 이동한 변위를 계측할 수 있다.

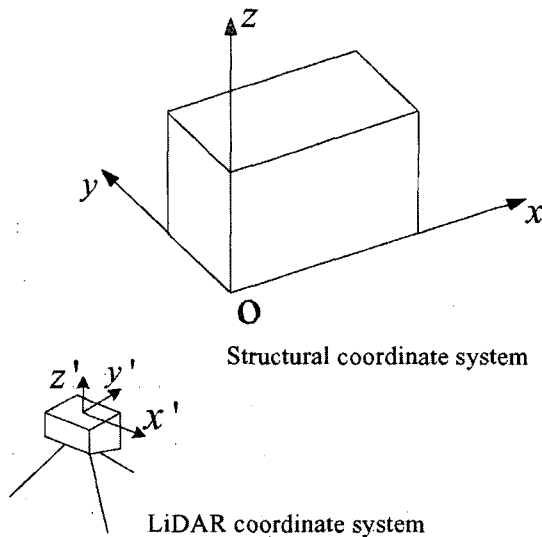


그림 4. 라이다 좌표계와 구조물 좌표계

3.5 고층 건물에서의 변위 계측 기법의 활용

고층 건물에서의 변위 계측 기법의 활용은 접근이 어려운 고층 건물 최상층의 정적 변위와 동적 변위 계측을 들 수 있다.

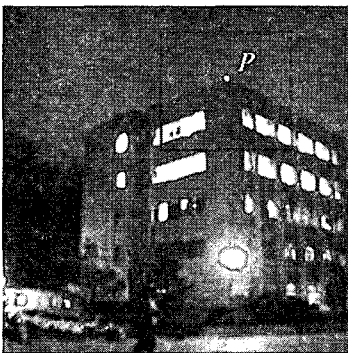
라이다를 이용하여 3차원 좌표 정보를 획득하고 3장의 변위 계측 기법을 이용하여 대상 구조물의 구조 정보를 계측하기 위해서는 고려해야 할 요소가 있다. 대상 구조물의 3차원 좌표 정보를 획득 할 경우 라이다 장비 성능에 따라서 각각의 1개 좌표 정보당 획득하는데 소요 되는 시간이 있기 때문에 동적 거동에 대한 구조 정보를 계측 할 경우 최소한의 좌표 정보를 이용하여야 한다. 라이다 3차원 좌표 획득에 있어서 크게 정적 변위 계측과 동적 변위 계측으로 구분할 수 있다. 정적 변위 계측과 동적 변위 계측의 구분 기준은 획득되는 좌표 정보 양과 관련된 획득 시간이다. 동적 변위 계측을 목적으로 변위 계측 기법을 구성할 경우에는 최소한의 좌표 정보를 이용하고, 최대한의 신뢰도를 발휘 하여야 하기 때문에 정적 변위 계측과 비교해 볼 때 상대적으로 제약이 따른다. 정적 변위 계측은 시간에 대한 제약을 받지 않기 때문에 좌표 정보 양에 따른 제한은 없지만 충분한 신뢰도를 갖는 적절한 좌표 정보의 양이 있을 것이며 구조물의 변형 특성, 측정 거리, 거동 규모 등에 의해 좌우 될 것으로 예상된다.

4. 실험을 통한 검증

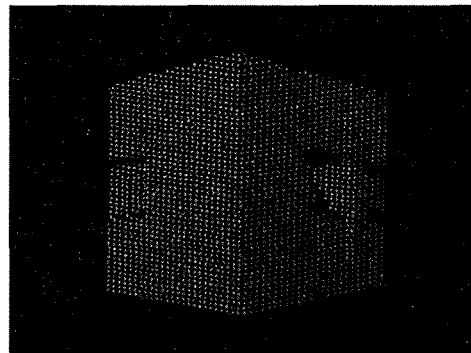
본 연구에서는 최소 제곱 근사 이론 및 구조물의 3차원 공간상에서의 기하학적 특성을 이용하여 필요한 구조 정보를 획득할 수 있는 변위 계측 기법을 제시하였다. 본 장에서는 변위 계측 기법의 적용성을 알아보기 위하여 그림 5(a)와 같은 변위가 발생하지 않는 실제 5층 건물 최상층의 특정 위치(P)의 변위를 10회 반복적으로 계측하고 각각의 값들을 비교하여 정밀도를 분석하였다.

4.1 라이다를 이용한 3차원 좌표 획득

그림 5(b)는 라이다를 이용하여 대상 건물 최상층 특정 위치(그림 5(a))의 3차원 좌표 정보를 획득한 영상이다. 라이다 장치와 실험 대상과의 측정 거리는 약 50 m 이며 레이저 스폿 간격은 대상 지점에서 약 100 mm 이다. 면의 방정식을 생성하기 위해서 그림 5(b)에서 왼쪽과 오른쪽 면에서 각각 200개의 3차원 좌표 정보를 이용하였다.



(a)



(b)

그림 5. 검증을 위한 5층 건물의 형상 정보 획득

표 2 라이다 변위 계측 기법을 이용하여 계측한 5층 건물 P점 위치의 x, y방향 좌표

Direction		x,y coordinates in point P (units:mm)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P	P_x	0.9	-0.1	-6.9	5.4	1.4	-4.2	0.5	-3.0	-1.7	-4.1
	P_y	1.1	-8.9	2.9	3.9	2.0	2.9	-3.4	2.7	-1.6	-4.5

4.2 변위 계측

라이다를 이용하여 획득한 3차원 좌표 정보를 최소 제곱 근사 이론을 이용하여 두개의 면의 방정식 (Plane_A, Plane_B)을 구하고, 여기서 두 면이 교차하는 교선(모서리)의 방정식(\overline{OP})을 구한다. 획득된 좌표 값 중 z축에 대해서 가장 큰 좌표와 작은 좌표를 이용하여 교선에 수직한 평면의 방정식(Plane_C, Plane_D)을 구한다. Plane_C, Plane_D, \overline{OP} 를 이용하여 교점(P)를 구할 수 있고, 좌표 값을 확인하여 변위를 계측할 수 있다(그림 6(a)). 그림 6(b)는 그림 6(a)의 과정을 10번 반복하여 구한 교선(모서리)의 방정식 (\overline{OP})을 나타내며 그림 7은 이때의 점(P)의 변위 이력을 나타낸다.

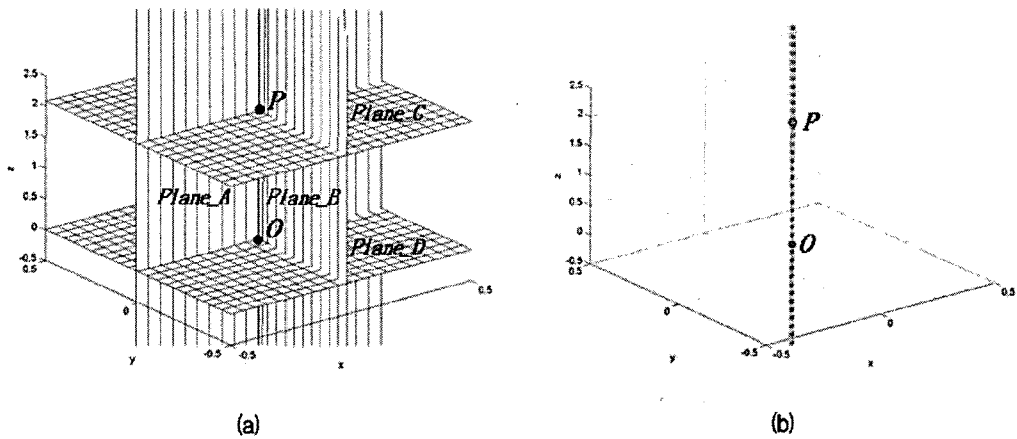


그림 6. 최소 제곱 근사 이론 및 기하학적 관계를 이용한 P점 좌표의 획득 (10회)

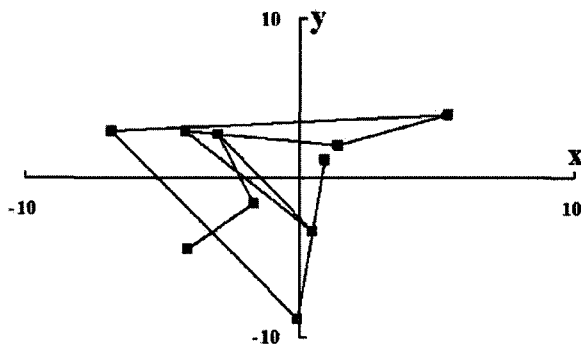


그림 7. P점 좌표의 변위 이력 (units:mm)

4.3 정밀도 분석

라이다 변위 계측 기법을 이용하여 건물 최상층의 특정 위치(P)의 변위 이력을 확인한 결과 10 mm 이내의 정밀도를 나타내었음을 확인하였다(표 2).

5. 결 론

본 연구에서는 라이다를 이용하여 고층 건물의 수평 변위 계측을 위한 기법을 제시하였고, 현재 존재하고 있는 5층 건물에 적용하여 기법에 대한 적용성을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 라이다를 이용한 변위 계측 기법을 이용하여 건물의 수평 변위 계측을 할 수 있었다.
- (2) 수평 변위 계측 값을 분석하여 정밀도를 확인한 결과 10 mm 오차 범위 이내에서 변위 계측이 가능함을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

- Celebi M. (2000) GPS in dynamic monitoring of long-period structures, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 20, pp.477~483.
- Tamura Y., Matsui M., Pagnini L.C., Ishibashi R., Yoshida A. (2002) Measurement of Wind-induced response of buildings using RTK-GPS, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, pp.1783~1793.
- Ackemann, F. (1999) Airborne laser scanning-present status and future expectations, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, pp.64~67.
- H. Anton (2000) Elementary Linear Algebra. *John Wiley & Sons, Inc.*