

영상 기반 변위 계측장치의 현장 적용 성능 평가

조수진¹, 심성한^{1*}, 김은성²

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²한국유지관리(주) SI사업부

On-site Performance Evaluation of a Vision-based Displacement Measurement System

Soojin Cho¹, Sung-Han Sim^{1*}, Eunsung Kim²

¹School of Urban and Environmental Engineering, UNIST

²Division of System Integration, Korea Maintenance Co. LTD

요약 본 연구에서는 대표적인 토목구조물인 교량에서 영상 기반 변위 계측장치(VDMS)를 이용하여 변위를 측정하고, 고가의 변위측정장비인 LDV와의 비교를 통하여 그 현장 적용 성능을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 VDMS는 카메라와 마커, 프레임 그래버, 노트북으로 구성되었으며, 마커를 구조물에 부착하여 그 영상을 촬영하고 평면 호모그래피 기법을 이용하여 마커가 부착된 구조물의 변위를 측정하는 장치이다. 개발된 VDMS의 성능 검증을 위하여 우선 소형 구조물을 이용한 간단한 실내 실험을 수행하였다. 다음으로 실제 철도교량에서 KTX를 다양한 조건으로 주행하고, 그에 의하여 발생한 변위를 VDMS과 LDV를 이용하여 계측한 뒤, 얻어진 두 변위를 비교하여 VDMS의 현장 적용 성능을 평가하였다.

Abstract The on-site performance of a vision-based displacement measurement system (VDMS) was evaluated through a field test on a bridge. The VDMS used in this study is composed of a camera, a marker, a frame grabber, and a laptop. The system measures the displacement by attaching a marker at the location to be measured on the structure, by capturing images of that marker with a fixed rate, and by processing a series of images using a planar homography technique. The developed system was first validated from a laboratory test using a small-scale building structure. The VDMS was then employed in a field test on a railroad bridge with a KTX train running under various conditions. The on-site performance was evaluated by comparing the obtained displacement using the VDMS with the displacement measured from a laser Doppler vibrometer (LDV), which is an expensive and accurate displacement measurement device.

Key Words : Bridge, Displacement, LDV, Computer Vision

1. 서론

구조물의 건전도를 평가하기 위하여, 변위는 매우 중요한 계측 응답 중 하나이다. 변위는 구조물이 하중을 받았을 때 그에 대응하여 나타나는 구조물의 고유한 거동 특성으로, 그 절대 크기 및 동적 특성 등을 통하여 구조물의 건전성 및 상태를 파악할 수 있다. 구조물이 기준에 초과하는 하중을 받거나, 구조물의 부재가 손상을 입었을 경우, 구조물에서는 상당한 변위가 발생하게 되므로,

현재 구조물의 유지관리에 있어서 변위는 매우 중요한 응답으로 측정되고 있다.

구조물에서 변위를 측정하기 위하여 가장 많이 사용되는 장비는 바로 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)나 변형률 기반 변형률계와 같은 접촉식 변위계이다. 접촉식 변위계는 탄성이 있는 부재를 구조물에 접촉한 뒤, 구조물이 거동할 때 탄성부재의 움직임을 통하여 구조물의 변위를 측정한다. LVDT의 경우 끝에 자석이 부착된 실린더를 부착시켜 실린더가 움직일 경우

본 논문은 "400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발" 사업(국토해양부)의 일환으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sung-Han Sim(UNIST)

Tel: +82-52-217-2816 email: ssm@unist.ac.kr

Received June 12, 2014

Revised (1st September 5, 2014, 2nd September 10, 2014)

Accepted September 11, 2014

실린더를 감싸고 있는 1차 코일과 2차 코일의 유도자기의 변화를 통해 변위를 계측한다[1]. 변형률 기반 변위계는 와이어(피아노선이나 강선)을 적절한 장력과 함께 구조물에 부착시키고 그 끝에 변형률계가 설치된 링 또는 캔틸레버형 장치를 연결하여, 구조물이 거동할 때 와이어를 따라 함께 거동하는 장치의 변형률을 변위로 환산한다. 접촉식 변위계는 계측하고자 하는 구조물의 변위를 직접 계측하므로, 정확도가 높고 사용 범위가 넓다. 그러나 규모가 있는 구조물에서 사용할 경우, 계측기를 구조물과 접촉하기 위한 추가설비(비계 등) 또는 긴 와이어로 인한 오차 발생이 큰 문제가 된다.

기존 접촉식 계측기 이외에도 다양한 최신 기술을 이용한 변위 계측기들이 개발되었다. LDV(Laser Doppler Vibrometer)는 레이저를 계측하고자 하는 위치에 쏘아 반사시킨 뒤, 도플러 쉬프트(Doppler Shift) 기술을 이용해 속도를 측정, 이를 환산하여 변위를 측정한다[2]. LDV는 매우 높은 정확도로 변위 계측이 가능하지만, 장비 가격이 매우 비싸고 레이저의 방향이 계측하고자 하는 방향과 동일해야 하는 현장에서 적용 시 문제점이 있다. GPS(Global Positioning System)는 위성에서 보내는 신호의 시차를 이용하여 변위를 계측하는 방식으로, 기준점이 인공위성에 있기 때문에 계측을 자유롭게 수행할 수 있다[3]. 그러나 구조물에 이용되는 GPS의 경우 역시 가격이 매우 비싸며 그 해상도 역시 밀리미터(mm) 수준으로 낮아 일반적으로 활용하기는 어려운 것이 사실이다.

영상 기반 변위 계측 시스템(Vision-based Displacement Measurement System, 이하 VDMS)은 카메라나 캠코더, CCTV와 같은 영상 장치를 이용하여 구조물의 움직임을 촬영하고, 촬영된 영상을 분석하여 구조물의 변위를 측정하는 장치이다. 분석 시 영상 내에서 구조물 자체의 특징점(feature)의 움직임을 분석하여 구조물의 변위를 얻거나, 분석이 용이한 특징을 갖는 마커(marker)를 변위를 계측하고자 하는 곳에 부착한 뒤 그 특징점의 움직임을 분석하기도 한다. 마커를 이용하지 않는 경우 활용하는 특징점으로는 꼭지점, 모서리 등이 있으며(Yilmaz et al., 2006), 마커를 이용하는 경우에는 주로 분석이 쉬운 체커보드나 시인성(Visibility)이 좋은 흑백 무늬의 마커를 많이 사용한다[4,5]. 일반적으로는 측정판을 이용하지 않은 경우 측정판을 제작하고 설치하는 등의 작업을 줄일 수 있다는 장점이 있지만, 측정판의 설치가 어렵지 않은 경우에는 측정판을 사용하는 것이 계

측의 정확도를 높일 수 있다[4].

본 연구에서는 대표적인 토목구조물인 교량에서 VDMS를 이용하여 변위를 측정하고 그 성능을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 VDMS는 카메라와 마커, 프레임 그래버, 노트북으로 구성되었으며, 마커를 구조물에 부착하여 그 영상을 촬영하고 평면 호모그래피 기법을 이용하여 마커가 부착된 구조물의 변위를 측정한다[5]. 본 VDMS의 성능 평가를 위하여 정확도가 높은 것으로 알려진 LDV를 이용하여 변위를 함께 계측하여 그 성능을 평가하였다. 우선 소형 구조물을 이용한 간단한 실내 실험을 통하여 VDMS의 기본 성능을 평가하였다. 다음으로 실제 철도교량에서 KTX를 다양한 속도로 주행하고, 그에 의하여 발생한 변위를 VDMS과 LDV를 이용하여 계측한 뒤, 얻어진 두 변위를 비교하여 VDMS의 현장 적용 성능을 평가하였다.

2. 영상 기반 변위 계측 시스템

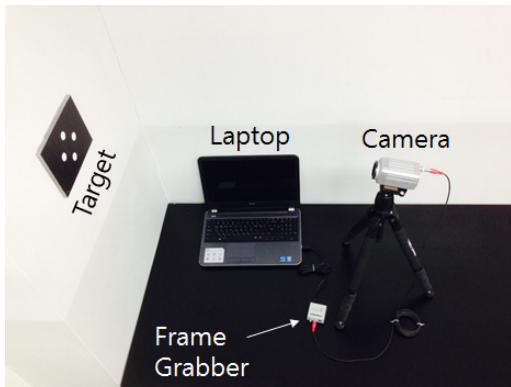
2.1 시스템 구성

본 연구에서 사용한 VDMS는 Fig. 1와 같이 카메라와 마커, 프레임 그래버(frame grabber)와 PC(노트북)로 구성된다. 사용된 카메라는 CCTV용으로 개발된 삼성테크윈 SCZ-2373로 37배까지의 광학줌이 가능하여 먼 곳에 설치한 마커의 움직임을 잘 포착할 수 있는 제품이다. 마커는 200mm×150mm의 검은색의 판으로, 내부에 지름 20mm의 흰 원이 네 개 다이아몬드 형으로 배치되어 있다. 사용한 프레임 그래버는 WithRobot MyVisionUSB2.0 제품으로 USB2.0을 이용하여 640x480의 해상도를 갖는 영상 데이터를 실시간으로 PC로 전송할 수 있다.

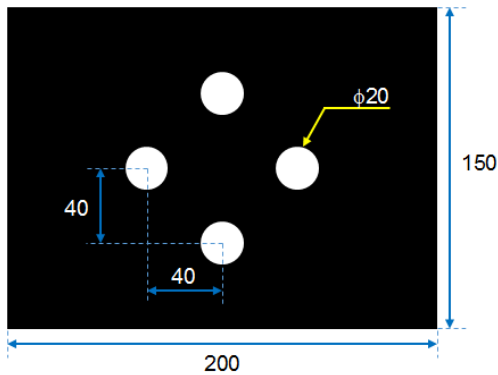
변위 계측은 구조물의 계측 위치에 네 점이 찍힌 마커를 부착한 뒤, 삼각대 등의 장비를 이용하여 잘 고정된 카메라로 마커의 움직임을 촬영한다. 촬영한 영상은 프레임 그래버를 이용해 노트북으로 실시간 전송되며, 이를 평면 호모그래피 관계를 이용하여 해석함으로써 변위를 얻을 수 있다. 영상 변위를 해석하는 방법은 Fig. 3에 도식하였다.

2.2 평면 호모그래피

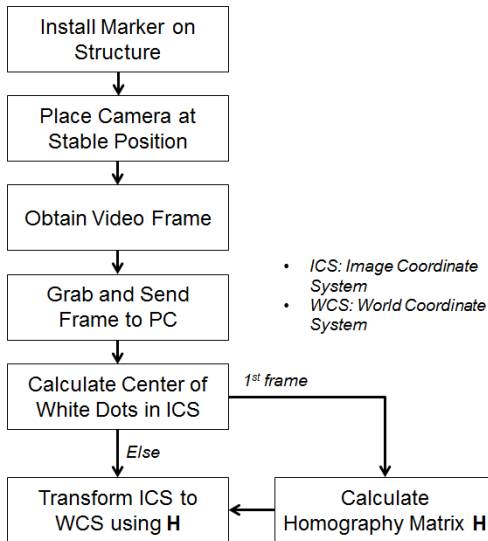
평면 호모그래피는 두 개의 평면 사이의 관계를



[Fig. 1] Vision-based Displacement Measurement System (VDMS)



[Fig. 2] Marker with dimension (unit: mm)



[Fig. 3] Flowchart of present VDMS

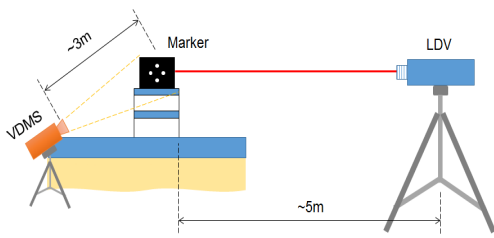
변환행렬로 표현하는 기법이다[6]. 이를 평판형태의 마커에 적용하면, 세계 좌표계(World Coordinate System)에 위치한 실제 평판 마커와 촬영된 영상 속 이미지 좌표계(Image Coordinate System)에 위치한 평판 사이의 관계를 나타내는 행렬이 존재한다. 세계 좌표계에 위치한 평면을 영상으로 촬영하면 이미지 좌표계로 원근 투영된다. 이 원근 투영은 3축 회전, 3축 평행이동, 수평-수직 방향 크기 조정의 8자유도의 움직임으로 표현되며, 이 움직임은 호모그래피 행렬로 표현할 수 있다.

8자유도의 호모그래피 행렬을 계산하기 위해서는 이미지 좌표계와 세계 좌표계에 공존하는 4개 이상의 특징점(수평, 수직방향 좌표를 활용할 경우 8자유도의 값을 얻을 수 있다)에 대한 좌료가 필요하다. 이것이 마커가 4개의 흰 점을 갖는 이유이다. 호모그래피를 계산하는 방법은 [6,7]을 참고하면 된다.

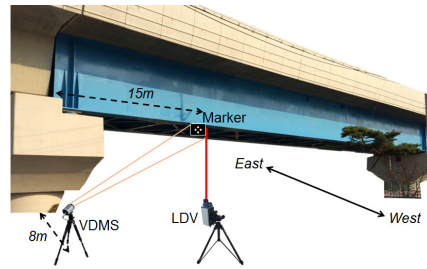
3. 실내 실험 성능 평가

현장 적용성을 판단하기 이전에, 간단한 실내실험을 통한 VDMS의 성능 평가를 수행하였다. Fig. 4는 실내 실험을 위한 장비의 설치위치를 보여준다. 우선 테이블의 위에 2층 전단구조물을 고정시킨 뒤, 그 상단에 마커를 설치하였다. VDMS의 성능을 평가하는 기준변위의 측정을 위하여, 마커에서 약 5m 떨어진 위치에 레이저가 마커의 옆면을 조준하도록 LDV를 설치하였다. VDMS는 마커에서 약 3m떨어진 위치에서 마커의 움직임을 촬영할 수 있도록 하였다. 구조물의 2층을 손으로 가진하였으며, 충격에 의한 자유진동과 무작위 충격을 주었다. VDMS는 29.97Hz, LDV는 1200Hz의 샘플링 주파수로 계측하였다.

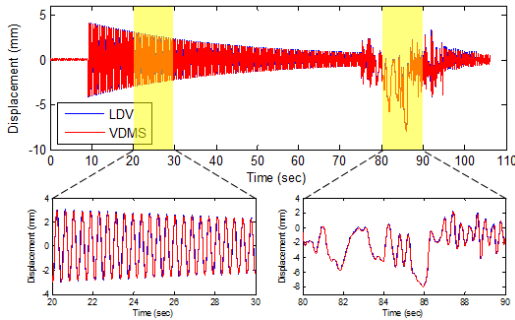
Fig. 5는 실내실험을 통하여 계측한 변위를 비교한 것이다. 위의 그림을 볼 때 VDMS가 LDV로 측정된 변위와 매우 유사함을 알 수 있다. 좀 더 자세한 비교를 위하여 자유진동구간과 무작위 충격 구간을 줌(zoom)해보았으며, 이때의 변위 또한 완벽하게 일치하는 수준의 변위로 나타났다. 이 실험결과를 통하여 기본적으로 VDMS가 충분히 현장에서 사용할 수 있는 정도의 정확성을 가지고 있음을 알 수 있다.



[Fig. 4] Laboratory Test Setup



[Fig. 6] Experimental Setup on Test Bridge



[Fig. 5] Comparison of Displacement Measured by VOMS and LDV in Laboratory Test

4. 현장 실험 성능 평가

4.1 시험교량과 현장실험 셋업

위 실내실험과 동일한 장비를 이용하여 실제 철도교량에서 KTX에 의한 변위를 VOMS와 LDV를 이용하여 계측한 뒤, 얻어진 두 변위를 비교하여 현장 적용 성능을 평가하였다. 실험을 수행한 교량은 2014년 노반공사가 완공된 전라북도 정읍시에 위치한 호남고속선 강합성교량으로, 두 개의 큰 강주형(Steel Girder)에 의하여 지지된다. 경간장은 50m이며, 복선철로가 설치되어 있다. 계측은 서쪽 주형(Girder)의 처짐을 계측하였다. 교량의 하부에는 농수로가 위치하고 있어 주형 중앙의 처짐을 계측할 수 없었기 때문에, 한쪽 교각으로부터 15m 떨어진 지점(약 1/3지점)의 처짐을 계측하였다. Fig. 6은 실험을 수행한 강합성교와 설치된 VOMS와 LDV의 위치를 나타낸다. LDV는 계측위치의 수직하부에 설치하였으며, VOMS는 계측위치에 마커를 설치하고 교각에서 서쪽으로 약 8m 떨어진 위치에 카메라를 설치하고 줌을 이용하여 마커의 영상을 취득하였다. 실내실험과 마찬가지로 VOMS는 29,97Hz, LDV는 1200Hz의 샘플링 주파수로 계측하였다.

본 실험에 사용된 KTX는 새로 개발된 10량짜리 KTX-호남이다. 실험 당시 대상 교량이 공용중이 아니었기 때문에, KTX를 다양한 선로와 방향, 속도로 운행할 수 있었다. 본 논문의 목표는 VOMS의 현장실험 성능을 평가하는 것이므로, 이 중 대표적인 4 가지 KTX 운행 시나리오에 대한 분석만을 수행하고자 한다. 본 논문에서 분석한 4가지 시나리오의 세부적인 특징은 다음 Table 1에 정리하였다.

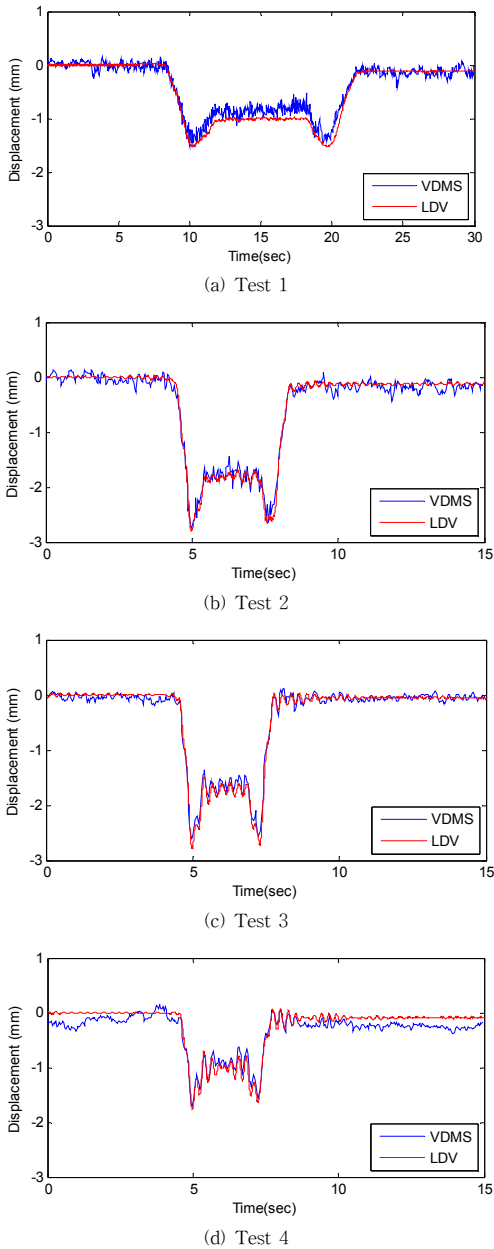
[Table 1] Test Scenario for KTX runs

	Rail	Direction	Speed
Test 1	East	Southbound	60km/h
Test 2	West	Southbound	230km/h
Test 3	West	Northbound	270km/h
Test 4	East	Northbound	300km/h

4.2 현장 시험 성능 평가

다음 Fig. 5는 4가지 시나리오에서 VOMS와 LDV를 이용하여 계측한 변위(처짐)을 비교한 것이다. 전반적으로 비교를 해보면, VOMS는 모든 시나리오에서 LDV와 매우 유사한 변위를 계측함으로써, KTX의 주행에 의한 동적변위를 매우 효과적으로 계측하였음을 알 수 있다. 계측방향이 서쪽 주형이었기 때문에 KTX가 서쪽 선로로 주행한 Test 2와 3에 대해서는 전반적으로 처짐이 크게 (약 2.7-8mm) 나타났으며, KTX가 동쪽 선로로 주행한 Test 1과 4에 대해서는 더 작은 (약 1.5-7mm)의 처짐이 나타났음을 알 수 있다.

좀 더 자세히 들여다보면 KTX의 속도가 상대적으로 낮은 Test 1에서 다른 시나리오에 비해 상대적으로 오차가 크게 나타났다. 이는 더욱 빠르게 동적변위가 발생한 Test 2와 Test 3의 경우에는 오히려 오차가 더 작은 것을 감안한다면 이해하기 힘든 부분이지만, Test 4에서 기차가



[Fig. 7] Comparison of Displacement Measured by VDMS and LDV from field test

교량에 진입하기 전과 후에 VDMS가 LDV 대비 큰 오차를 유발하는 것으로부터 원인을 파악할 수 있다. 카메라와 LDV 모두 삼각대를 이용하여 지지되었으나, 카메라의 경우 카메라의 가격과 무게를 감안하여 상대적으로 저렴한 삼각대를 사용하였으며, 그에 따라서 바람과 같

은 외력에 취약하게 흔들리는 것을 관찰하였다. 이와 같이 외부적 요인에 의한 카메라의 흔들림이 존재할 경우, 저속으로 KTX가 주행하는 Test 1과 같이 계속시간이 긴 경우 상대적으로 큰 오차가 나타나는 것처럼 보이게 된다. 이는 Test 4에서 기차가 진입하기 전과 후에 VDMS를 이용하여 측정한 변위가 약 0.3mm 정도의 크기로 변동하는 것과 같은 증상이다. Test 2와 Test 3의 경우에도 약간의 변동이 있으나, 바람이 세지 않아 큰 변동은 일어나지 않았다.

다음 Table 2와 Table 3은 열차의 양 끝 기관차에 의하여 발생하는 왼쪽 피크 변위와 오른쪽 피크 변위를 비교한 결과이다. 열차가 교량에 진입할 때 발생하는 왼쪽 최대 변위의 경우 평균 3.78%, 최대 6.62%의 오차가 발생하였으며, 열차가 교량에서 빠져나갈 때 발생하는 오른쪽 최대 변위의 경우 평균 4.52%, 최대 7.28%의 오차가 발생하였다. 전반적으로 보면 이러한 오차 정도는 현장 적용의 편의성을 감안할 때, 충분히 허용가능한 오차로 사료된다. 특히 모든 Test 경우에서 교량이 진입할 때 보다 교량에 진입한 이후 오차가 더 크게 나타난 것으로 보아, 열차에 의한 교량의 진동이 카메라에 까지 전달되어 오차가 더 커진 것으로 짐작할 수 있다.

[Table 2] Comparison of Left Peak Displacements

	VDMS (mm)	LDV (mm)	Error (%)
Test 1	1.459	1.521	4.08
Test 2	2.754	2.803	1.75
Test 3	2.596	2.780	6.62
Test 4	1.714	1.761	2.67

[Table 3] Comparison of Right Peak Displacements

	VDMS (mm)	LDV (mm)	Error (%)
Test 1	1.426	1.538	7.28
Test 2	2.642	2.662	0.75
Test 3	2.563	2.718	5.70
Test 4	1.567	1.638	4.33

이 결과를 종합하여 볼 때, VDMS는 교량과 같은 구조물에서 수 mm단위의 미소한 변위를 측정하는데 충분히 활용할 수 있는 것으로 판단된다. 특히 주변 진동원이거나 바람과 같은 외력에 의하여 오차가 크게 나타날 수 있

기 때문에, 미소한 변위를 측정하는 경우에는 특히 주변 진동에 대한 보완책(더욱 튼튼한 삼각대의 사용, 무게추를 이용한 삼각대의 지지, 적절한 방풍장비의 활용 등)이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 대표적인 토목구조물인 교량에서 평면 호모그래피를 활용하는 VDMS를 이용하여 변위를 측정하고, 그 성능을 대표적인 고가의 변위 계측장비인 LDV와의 비교를 통하여 평가하였다. 현장 실험에 앞서서 소형 구조물을 이용한 간단한 실내 실험을 수행하였으며, 이 경우 VDMS는 매우 높은 정확도의 변위를 추정함을 알 수 있었다. 다음으로 실제 철도교량에서 KTX를 다양한 시나리오로 주행하고, 그에 의하여 발생한 변위를 VDMS과 LDV를 이용하여 계측한 뒤, 얻어진 두 변위를 비교하여 VDMS의 현장 적용 성능을 평가하였다. 다양한 시나리오에 대하여 VDMS는 상당히 높은 정확도로 동적변위를 계측하였으나, 바람에 의한 것으로 보이는 오차가 발생하였으며, 그에 따라 현장에서 사용할 경우 적절한 대비책이 필요한 것으로 판단된다.

References

[1] H. Tariq, A. Takamori, F. Vetrano, C. Wang, A. Bertolini, G. Calamai, R. DeSalvo, A. Gennai, L. Lollway, G. Losurdo, S. Marka, M. Mazzoni, F. Paoletti, D. Passuello, V. Sannibale, R. Stanga, "The linear variable differential transformer (LVDT) position sensor for gravitational wave interferometer low-frequency controls," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 489(1), pp. 570-576, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00802-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00802-1)

[2] P. Castellini, M. Martarelli, E. P. Tomasini "Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(6), 1265-1285, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.11.015>

[3] S. B. Im, S. Hurlbaas, Y. H. Kang, "Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring," *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 139(10), pp.

1653-1664, 2013.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000475](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000475)

- [4] J. J. Lee, M. Shinozuka, "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement." *Ndt & E International*, 39(5), pp. 425-431, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.12.003>
- [5] C. C. Chang, X. H. Xiao, "Three-dimensional Structural Translation and Rotation Measurement Using Monocular Videogrammetry," *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 136(7), pp. 840-848, 2010.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000127](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000127)
- [6] R. Szaliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, New York, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0>
- [7] J-H. Lee, S. Cho, H-J. Kim, S-H. Sim, "Vision-based Displacement Measurement System for Civil Structures," *Proceedings of the 2014 Spring KSMI Conference*, pp. 765-768, 2014.

조 수 진(Soojin Cho)

[정회원]



- 2005년 8월 : KAIST 건설 및 환경공학과 (토목공학 석사)
- 2011년 2월 : KAIST 건설 및 환경공학과 (토목공학 박사)
- 2011년 5월 ~ 2013년 8월 : 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign 박사후연구원
- 2013년 10월 ~ 현재 : UNIST 도시환경공학부 연구교수

<관심분야>

구조물 안전, 스마트 센서, 구조물 계측, 구조동역학

심 성 한(Sung-Han Sim)

[정회원]



- 2002년 2월 : KAIST 건설및환경공학과 (토목공학 석사)
- 2011년 5월 : Univ. of Illinois 토목환경공학과 (토목공학 박사)
- 2011년 7월 ~ 현재 : UNIST 도시환경공학부 조교수

<관심분야>

구조동역학, 구조물 건전성 모니터링, 스마트 센서

김 은 성(Eunsung Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 1월 ~ 2000년 10월 : 삼성물산(주) 건설기술연구소
- 2000년 11월 ~ 2006년 9월 :(주)코아텍 S/W기술연구소

•2006년 12월 ~ 현재 : 한국유지관리(주) SI사업부

<관심분야>

구조물 건전성 모니터링 시스템, 무선 계측