

국산 고정밀 가속도계의 건설 구조물 적용성 평가

권 남 열¹ · 강 두 영¹ · 손 훈^{2*}

¹풍산 FNS R&D 사업실, ²한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Application of High-precision Accelerometer Made in Korea to Health Monitoring of Civil Infrastructures

Nam-Yeol Kwon¹, Doo-Young Kang¹ and Hoon Sohn^{2*}

¹R&D Center, Poongsan FNS, Nonsan, 33003, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Korea

Abstract

A high-precision force-feedback 3-axes accelerometer developed in Korea has been investigated and studied for the verification of feasibility in the computational analysis and health monitoring of civil infrastructures. Through a series of experiment, the nonlinearity, bandwidth, low-frequency signal measurement accuracy and bias characteristics of the accelerometer has been thoroughly compared to those of two accelerometers produced by two market leaders in domestic and global accelerometer market. The experiment results shows that the overall measurement performance of the accelerometer has superiority over the performance of the two accelerometers from global market leader companies. Especially, the accelerometer shows a better low-frequency signal measurement accuracy and constant bias characteristic, which are mostly required in the computational analysis and the long-term health monitoring of large-scale civil infrastructures.

Keywords : force-feedback accelerometer, nonlinearity, bandwidth, measurement accuracy, bias

1. 서 론

건설인프라 구조물의 동적거동 전산해석과 건전성 모니터링에 있어, 가속도계는 구조물의 거동 데이터 취득을 위해 가장 많이 활용되고 있는 센서 가운데 하나다. 가속도계는 (1) 구조물의 계측 위치에 단순 부착하면 되므로, 변위가 발생하지 않는 고정된 위치를 확보하여 설치해야 하는 변위, 속도 센서보다 설치의 제약이 없고, (2) 가격이 경제적이고 망실의 위험도가 낮아 상시계측이 가능하며, (2) 잡음특성과 정확도가 우수해 계측치의 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 일례로 레이저 도플러 진동계(laser doppler vibrometer)는 μm 급의 고정밀도로 물체의 면외변위를 계측 가능하나(Siringoringo and Fujino, 2009; Johansmann *et al.*, 2005) 대당 단가가 1억 원을 상회하고 지면에 설치해야 할 뿐 아니라, 진동이

없는 단단한 지면에 설치해야 하므로 해상교량 등 열악한 환경에서는 상시계측이 현실적으로 어려워 제한된 환경조건에서의 단기계측에만 주로 적용되고 있다.

이처럼 건설 구조물 해석 및 모니터링 분야에서 가속도계의 입지가 매우 굳건함에도, 국내에서 구조물용 가속도계를 생산하는 업체가 거의 전무한 실정이며 대부분의 계측장비 및 센서들을 외국에서 수입하고 있다. 일례로 남해대교, 영종대교, 서해대교 등 대다수의 특수교 모니터링에 미국 Kinometrics 사의 가속도계가 적용되고 있다(Korea Expressway Corporation, 2012). MEMS형과 같은 저가형 가속도계는 2000년대 초반 국산화에 성공해 여러 분야에 적용하고 있으나, 건설 구조물 적용에는 난해한 점이 많다. 특히 구조물의 저주파 대역 응답을 지속적이고 안정적으로 계측하려면 DC 대역의 계측이 가능해야 하며, 모니터링 결과의 정확도 확보를 위해

* Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3625; E-mail: hoonsohn@kaist.ac.kr

Received May 4 2016; Revised May 17 2016;

Accepted May 18 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연중 온도변화에 따른 바이어스 변동량을 최소화해야 하므로 여전히 건설 구조물 모니터링 시장에서는 상대적으로 고성능인 수입 제품이 절대 우위를 차지하고 있는 실정이다.

그럼에도 건설 구조물에 적용되는 수입 가속도계는 국내 규정의 미비로 인해 인증이나 검정 과정을 거치지 않으며, 가속도계의 성능 평가를 위해서는 제조업체에서 제공한 자체 검정 데이터에 의존해야 한다. 기상청에서 구축하는 지진 모니터링 시스템에 적용되는 가속도계는 성능을 입증해야 하는 조건이 있으나 특수고 등 일반 구조물에 적용되는 가속도계의 성능을 규정한 지침이나 법령은 전무하여, 전문가들이 제조업체의 검정 데이터에 기반하여 센서를 선정, 설치하고 있는 실정이다. 이러한 상황은 상시계측의 정밀도에 문제를 야기할 가능성이 높은데, 일례로 국내 구조물 계측용으로 수입되는 가속도계는 주로 지진가속도 계측에 특화되어 있어 DC 대역 계측이 가능한 force-feedback 방식 가속도계의 경우에도 저주파 대역에서의 응답특성이 고주파 대역에 비해 좋지 않은 경우가 많다. 따라서 갈수록 증가해 가고 있는 건설 구조물 모니터링의 수요에 부응하고 구조물의 특성에 맞는 계측 시스템을 구축하기 위해서는 가속도계 분야에서 기술 자립 및 국산화를 도모해야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 국산 유도무기 항법체제에 적용되고 있는 고정밀 국산 force-feedback 방식 가속도계의 건설 구조물 적용성에 대해 논한다. 현재 국내 교량 및 지진 모니터링 시스템에 가장 많이 적용되고 있는 미국 Kinemetrics사의 가속도계 및 저가형 MEMS 가속도계와의 성능 분석을 통해 국산 가속도계의 적용 가능성을 비교, 평가한다. 이를 위해 실험실 수준의 가속도계 정밀 시험 평가를 수행하였으며, 또한 건설 구조물의 진동특성에 맞는 가진 환경을 인위적으로 생성하여 실제 구조물 응답에 대해 정밀도 및 바이어스 특성을 비교한다.

2. 본 론

2장에서는 연구 대상인 국산 가속도계를 소개하고, 많이 활용되는 수입 가속도계와의 성능비교 실험 및 그 결과에 대해 논한다.

2.1 국산 가속도계 개요

본 연구에서 선정된 국산 가속도계는 풍산 FNS의 force-feedback 방식 3축 가속도계로(Fig. 1), 실리콘 기반의 진자를 이용하여 가속도를 측정하는 기계식 관성센서로서, 방위산업 분야에서 유도무기, 장갑차, 전차 등의 항법체제에

적용되어 온 고정밀 가속도계를 건설 구조물의 계측 특성에 맞춰 계측범위를 $\pm 4g$, 계측 주파수 대역을 DC-100Hz로 개량한 제품이다. 국산 가속도계는 MEMS 기법으로 제작된 펜듈럼, 영구자석, 복원코일을 통해 전자기 구동부를 구성하고, 건설 구조물의 연중 온도변화에 대처하고자 온도전달 특성 개선에 초점을 맞춰 전자회로를 설계한 것이 특징이다.

가속도계의 기본 원리는 Fig. 2에 간략히 도식화되어 있다. 가속도센서에 그림과 같이 중력가속도인 $+1g$ 에 해당하는 가속도가 가해지면 펜듈럼이 아래쪽으로 처지게 되는데, 이 때 용량기(capacitor) 단자인 중앙의 펜듈럼을 기준으로 양쪽 단자에는 정전용량(capacitance)차가 발생된다. 이 정전용량의 차이는 ΔV_{PO} 의 전압을 생성하는데, 이 전압 신호가 신호처리 후 가속도량에 비례하는 전압으로 출력되고, 복원코일(torquer coil)을 통해 구동토크(driving torque)를 발생시킨다.



Fig. 1 Developed three-axes force-feedback accelerometer

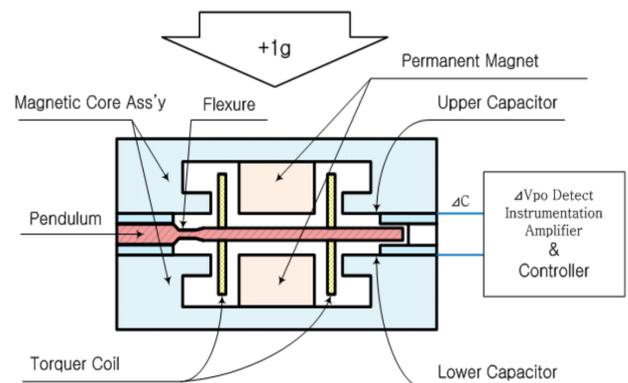


Fig. 2 Principle of the force-feedback accelerometer developed by Poongsan FNS

2.2 가속도계 비선형도 및 대역폭 비교실험

국산 가속도계의 계측 정확도를 평가하기 위해 비선형도와

대역폭 시험을 수행하였다. 일반적으로 가속도계에서 출력하는 전압은 실제 가속도의 크기에 선형비례하는 것이 가장 이상적이나, 센서자체의 특성 등의 요인으로 인해 완전한 비례관계를 갖지 못한다. 따라서 가속도계의 비선형성 정도는 매우 중요한 요인 가운데 하나다. 또한 대역폭은 (1) 가속도계의 계측 주파수 대역이 어느 정도인지, (2) 가속도계의 계측 가능 주파수 범위에서 계측치의 신뢰도가 어느 정도인지를 알려주는 주요 지표다.

Fig. 3은 가속도계의 비선형성을 평가하기 위해 Acutronic AC1130 1축 레이트 테이블에 가속도계를 장착한 것이다. 1축 레이트 테이블의 회전판에 가속도계를 설치하고, 회전판의 속도를 서서히 증가시키면 가속도계에 작용하는 회전가속도의 크기가 증가된다. 이를 통해 입력가속도의 크기와 가속도계의 출력가속도의 크기 관계의 선형성을 검증할 수 있다.

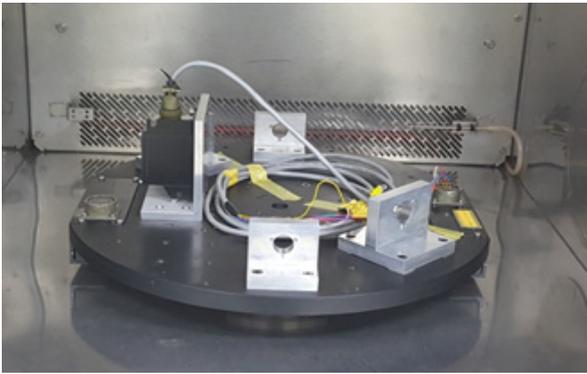


Fig. 3 Nonlinearity test of accelerometers using single-axis rate table

Fig. 4는 국산 가속도계와 Kinematics ES-U2의 비선형도를 보여주는 그래프다. 입력가속도와 출력가속도의 계측치는 최소자승오차(least mean square error) 기반으로 2차함수 회귀분석을 수행하는데, 이 때 2차 항의 계수가 작을수록 가속도계의 비선형도가 낮다. 회귀분석 결과 ES-U2는 2차 항의 계수가 -9.35×10^{-4} 을 보이는 반면 국산 가속도계는 -2.51×10^{-5} 의 값을 나타내, 불과 ES-U2 대비 2.7% 수준의 비선형성을 보이는 것으로 분석됐다.

가속도계의 대역폭은 진동시험장비에 5-500Hz 주파수 스위프 신호로 1g pk 레벨의 가속도를 가하면서 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 도식화되어 있다. 국산 가속도계의 계측 대역폭이 ES-U2보다 넓다. 또한 사인 스위프 신호가 원점 기준으로 대칭인 정현파임을 감안하면 출력 가속도 신호 역시 이상적으로는 상하 대칭이어야 하나, ES-U2의 경우에는 상하 대칭성이 어긋나고 있는 형태를 확인할 수 있다. 이 경향은 계측 도중 바이어스나 스케일 팩터 변화 등에 의해 원점이 변동되면서 발생하며, ES-U2의 경우 특히 저주파 대역에서

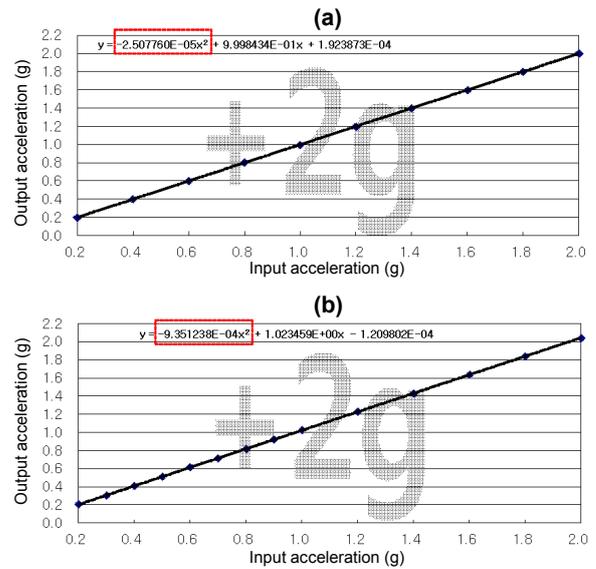


Fig. 4 Nonlinearity test results of accelerometers produced by (a) Poongsan FNS and (b) Kinematics

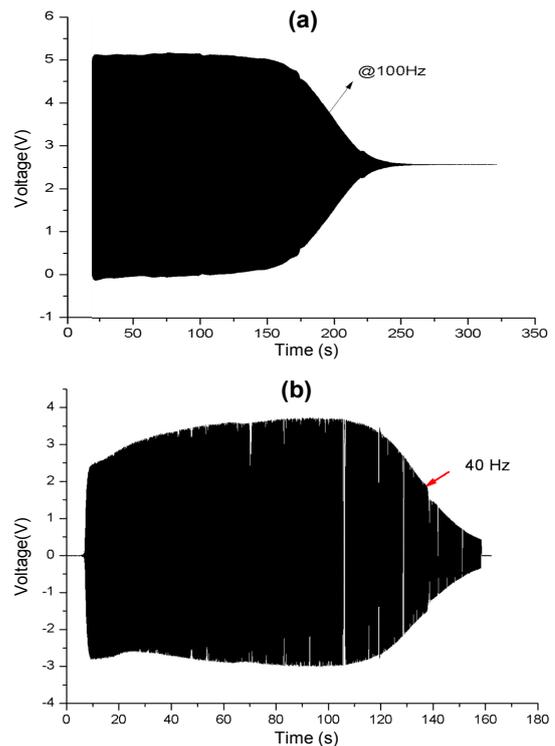


Fig. 5 Bandwidth test results of accelerometers produced by (a) Poongsan FNS and (b) Kinematics

두드러지는데, 이는 ES-U2가 지진 가속도 계측에 특화되어 상대적으로 저주파수 대역 성능을 중요시하지 않았기 때문으로 판단된다. 또한 ES-U2는 40Hz 이상의 대역에서 계측치가 급작스럽게 감소하는 현상이 보여, 50Hz 이상의 주파수 성분을 계측할 경우 신호의 왜곡이 심할 것으로 예상된다. 반면 국산 가속도계는 대칭을 잘 유지하고 있으며, 일반적으로

가속도계 출력의 -3dB지점을 계측가능 범위로 평가하므로 100Hz까지 무난하게 계측이 가능함을 확인할 수 있다.

2.3 저주파 대역 정밀도 및 바이어스 상수성 검증

건설 구조물은 주로 저주파 대역의 고유주파수를 갖기 때문에 상시계측에 있어 저주파 대역 계측 성능이 좋은 가속도계를 선택하는 것 필수적이다. 일례로 영종대교, 서해대교 등 초장대교량의 경우 0.5Hz이하의 극저주파수가 1차 모드 (Bae and Ha, 2002; Wen *et al.*, 2006), 구조물 거동에의 1차 모드 참여율을 고려하면 극저주파수 진동이 구조물의 동적거동을 지배한다고 할 수 있다.

이와 함께 가속도계의 바이어스 역시 건설 구조물 상시 계측에 있어 중요한 요소다. 가속도계의 바이어스는 상수인 것이 이상적이나 저주파수 잡음, 작동온도 등 여러 요인에 의해 비선형적으로 변화하며(Thong *et al.*, 2007), 특히 작동온도의 변화에 대해 최대 5mg/°C의 변화를 보인다 (Chau *et al.*, 1996). 이는 가속도계의 공학적 활용범위를 공진주파수 검출, 모드형상 해석 등으로 제한하는 가장 큰 요인이다. 가속도 데이터를 속도나 변위 등 다른 물리량으로 변환하려면 수치적 적분과정을 거쳐야 하나, 이 과정을 통해 가속도계의 오차 성분이 급격히 누적되므로 유의미한 데이터로 활용하기 어렵다. 특히 비선형 성분으로 인해 기준선 보정 (baseline correction) 기법(Moore, 1999; 2001; Stiros, 2008) 등 여러 변위환산 기법으로 정밀한 변위를 산정하기가 사실상 불가능하다. 최근 가속도계와 변위센서를 융합한 변위산정 기법이 소개됐으나(Smyth and Wu, 2007; Kim *et al.*, 2014; 2016), 가속도계의 바이어스가 상수에 가까운 특성을 보일수록 그 정확도가 상승한다는 연구결과도 소개된 바 있다(Kim *et al.*, 2014).

본 연구에서는 국산 가속도계의 저주파 대역 정밀도 및 바이어스 특성을 Kinematic ES-U2, PCB 3713E112G MEMS 가속도계와 실험을 통해 비교 분석하였다. 실험의 구성은 Fig. 6과 같다. 수평으로 진동하는 소형 가진기에 세 가속도계를 설치하고, 계측 정밀도 검증을 위한 레퍼런스 계측기로 Polytec사의 PSV-400 레이저 도플러 진동계(LDV)를 적용했다. LDV는 원래 속도를 계측하므로 이를 미분해서 가속도로 변환했으며, LDV의 잡음수준이 0.1μm/s 수준으로 낮으나 미분시 잡음이 증폭될 우려가 있어 컷오프 주파수가 50Hz인 저주파 통과 필터를 적용하였다. 세 가속도계는 작동 시작 후 내부온도 상승에 따른 바이어스 특성 변화를 최소화하기 위해, 전원 인가 후 1시간의 휴지 상태를 유지한 뒤 실험을 시작하였으며, 가속도계 불량에 따른 실험의 신뢰도

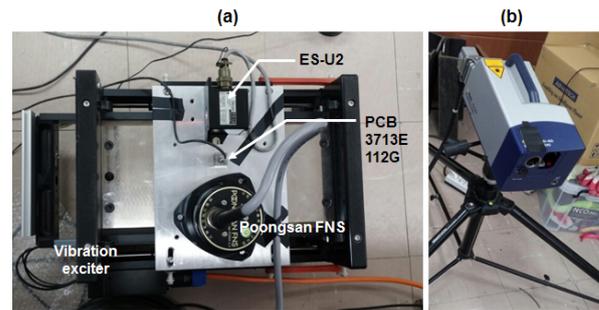


Fig. 6 Experimental setup: (a) Poongsan FNS accelerometer, ES-U2 and PCB 3713E112G MEMS accelerometer on a vibration exciter for horizontal excitation and (b) Polytec PSV-400 laser Doppler vibrometer for reference measurement

저하를 막기 위해 각 가속도계 별로 2기를 준비해 각 5회씩 총 10회의 실험을 반복수행했다.

저주파 대역 정밀도 검증을 위해서는 소형 가진기에 120초 길이의 0-10Hz 사인스weep신호를 입력하고 레퍼런스 계측치와의 RMS 오차를 계산하였다(Fig. 7). 그 결과 MEMS 형식인 PCB 3713E112G 가속도계의 RMS 오차가 0.0702m/s²로 가장 높은 값을 나타냈으며, 국산 가속도계는 0.0080m/s²로 최대치 대비 약 11% 수준의 낮은 오차를 보였다. 반면 Kinematics ES-U2 가속도계는 0.0141m/s²의 RMS 오차를 나타내 국산 가속도계 대비 176%의 오차를 보였다.

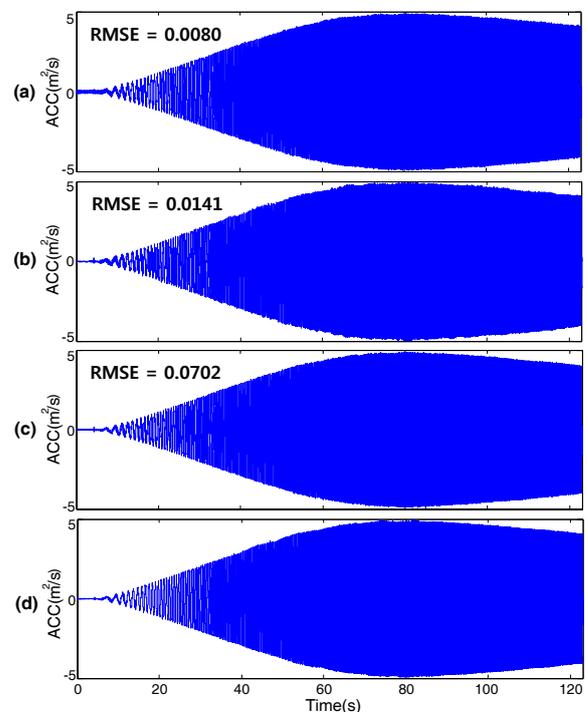


Fig. 7 Output response of accelerometers and reference to 0-10Hz sine sweeping input: (a) Poongsan FNS accelerometer, (b) ES-U2, (c) PCB 3713E112G MEMS accelerometer and (d) PSV-400 LDV(reference)

특히 장대교량의 공진주파수가 밀집되어 있는 1Hz이하 주파수 대역에서 RMS 오차의 차이는 더욱 큰 격차를 보이는데, 국산 가속도계는 0.0078m/s²로 큰 변화가 없는 반면 ES-U2는 0.0183m/s²로 증가하여, 국산 가속도계 대비 235%의 오차를 보였다. 이 결과는 국산 가속도계가 현재 가장 많이 적용되고 있는 수입 가속도계보다 건설 구조물 계측성능이 우월하다는 것을 보여준다.

바이어스 상수성 검증을 위해서는 El Centro 지진파를 1시간 동안 반복하여 가진기에 입력하였다. 가진기는 El Centro 지진 파형대로 60초 동안 가진되고(Fig. 8(a)), 135초 동안 정지상태에 있다 다시 가진을 시작하며, 총 1시간 동안 18회의 지진파 가진을 하면서 계측을 실시하였다(Fig. 8(b)). 단일 El centro 지진파의 평균값은 5.440×10⁻⁵으로 공학적 측면에서 0으로 간주할 수 있다.

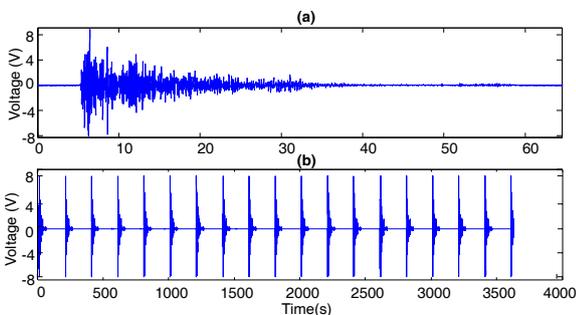


Fig. 8 Voltage signal input to vibration exciter: (a) El Centro earthquake signal for 60 sec, (b) repeated El Centro earthquake signals for 1 hour

세 가속도계 바이어스의 상수성을 검증하기 위해, 하나의 지진파의 반복주기인 195초 간격으로 계측치의 구간평균을 계산하였다. 지진파의 평균은 0에 근사할 수 있으며, 수평 방향으로 가진하여 세 가속도계 모두 중력가속도에 의한 1g 크기의 오프셋이 생기지 않으므로, 구간평균 하나의 값은 195초 동안 가속도계 바이어스의 평균으로 간주할 수 있다. 이러한 방식으로 각 가속도계마다 18개의 바이어스 구간 평균값이 계산되고, 시간에 따른 구간 평균값의 변화 추세를 통해 가속도계의 바이어스 상수성을 검증할 수 있다. 구간 평균값이 일정할수록 가속도계의 바이어스는 상수 특성을 갖는다고 평가할 수 있으며, 반대로 평균값이 크게 변할수록 바이어스는 더 많은 비선형성을 띤다고 할 수 있다.

Fig. 9는 세 가속도계의 195초 구간 평균을 시간별로 나타낸 그래프다. ES-U2 가속도계의 경우 계측시간이 늘어날수록 바이어스의 크기가 증가하는 현상을 보였다. 그러나 PCB 3713E112G 가속도계와 국산 가속도계는 상대적으로 안정적인 바이어스 상수성을 유지함을 확인할 수 있다. Table 1은 세 가속도계 구간 평균의 표준편차를 보여준다. 국산 가속도계는

0.175mm/s²의 표준편차를 보여 세 가속도계 가운데 가장 안정적인 바이어스 특성을 갖는 것으로 평가되었으나, PCB 3713E112G 가속도계는 0.389mm/s²로 국산 가속도계 대비 2.22배의 표준편차를 보였다. 특히 ES-U2의 경우 1.013 mm/s²로 국산 가속도계 대비 5.79배의 표준편차를 가질 뿐 아니라, 전원 인가 후 전력공급에 따른 온도변화가 평형을 이룰 때까지 1시간의 휴지시간을 두어 온도에 의한 영향을 제거했음에도 지속적으로 바이어스가 증가하는 현상을 보인다. 건설 구조물 상시 모니터링을 위한 계측 수행시 일반적으로 10cm/s² 수준의 가속도가 발생되는 것을 감안하면(Park *et al.*, 2006) 장기 계측시 결과에 영향을 미칠 수도 있는 수준으로 판단된다.

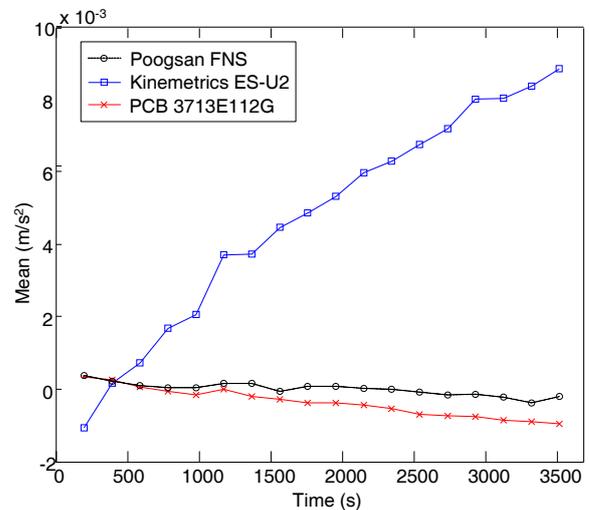


Fig. 9 195 second block average of biases of three accelerometers with respect to measurement time

Table 1 Standard deviation of the block average of biases of three accelerometers

Accelerometer	Poongsan FNS	PCB 3713E112G	Kinemetrics ES-U2
Standard deviation (mm/s ²)	0.175	0.389	1.013

3. 결 론

본 연구에서는 새로 개발된 건설 구조물용 국산 force-feedback형 3축 가속도계의 성능을 Kinemetrics ES-U2, PCB 3713E112G 가속도계와 비교 분석해 국산 가속도계의 계측 성능과 가능성을 실험을 통해 비교 평가하였다. 실험 결과 국산 가속도계는 모든 부분에서 국내 특수교량 계측 시장의 대부분을 점유하고 있는 Kinemetrics 사의 ES-U2 가속도계보다 우위를 보였다. 1축 레이트 테이블을 이용한

비선형도 비교 실험 결과 국산 가속도계는 ES-U2 대비 2.7% 수준의 우수한 비선형도를 나타냈으며, 대역폭 시험에서도 ES-U2보다 우수한 대역폭과 계측 안정도를 보였다. DC-10Hz의 저주파 대역 정밀도 평가 실험에서도 국산 가속도계의 RMS 오차는 ES-U2의 42.6% 수준이었고, 바이어스의 상수성을 평가하기 위해 바이어스 구간 평균의 표준편차를 비교한 결과 ES-U2의 17.3%에 불과할 정도로 좋은 특성을 보였다.

국내 규정의 미비로 별다른 공인인증이나 검정을 거치지 않은 수입 가속도계에 비해, 본 연구에서 비교 검증한 국산 가속도계는 엄격한 군용 센서 기준을 만족시켜 지속적으로 군용 납품되고 있는 고정밀 가속도계의 개량형인 점에 주목할 필요가 있다. 향후 경제성 분석 및 원가 절감이 이루어질 경우 수입 가속도계보다 월등히 저렴한 가격에 고성능 가속도계의 공급이 가능할 것으로 보인다. 본 논문에서는 가속도 계측 성능에만 초점을 맞추었지만, 우수한 바이어스 특성을 바탕으로 변위센서와 융합할 시 속도, 변위를 산정할 수도 있으며 force-feedback 가속도계의 원리 상 각변위의 계측도 가능하므로, 향후 건설 구조물 유지관리용 진전성 모니터링에 적용시 경사계, 가속도계, 속도계, 변위계를 하나의 센서로 대체할 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통연구개발사업의 연구비지원 (15CTAP-C097371-01)에 의해 수행되었습니다.

References

A study on Intelligent Bridge Diagnosis System and Evaluation Method (2012) *Annual Research Report*, Korea Expressway Corporation.

Bae, I.H., Ha, G.H. (2002) Structural Behavior on Self-Anchored Suspension Bridge with Three Dimensional Main Cable Using The Bridge Health Monitoring System, *Proc. Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, pp.672~675.

Castellini, P., Martarelli, P., Tomasini, E.P. (2006) Laser Doppler Vibrometry: Development of Advanced Solutions Answering to Technology's Needs, *Mech. Sys. & Signal Proc.*, 20, pp.1265~1285.

Chau, K.H.L., Lewis, S.R., Zhao, Y., Howe, R.T., Bart, S.F. (1996) An Integrated Force-balanced Capacitive Accelerometer for Low-g Application, *Sens. & Actuators A:Physical*, 54, pp.472~476.

Johansmann, M., Siegmund, G., Pineda, M. (2005) Targeting the Limits of Laser Doppler Vibrometry, *Proc. Int. Disk Equipment and Materials Association*, Tokyo, Japan, pp.1~12.

Moore, D.M. (1999) Effect of Baseline Corrections on Response Spectra for Two Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *U.S. Geological Survey Open-File Report* 99-545, 1999.

Moore, D.M. (2001) Effect of Baseline Corrections of Displacement and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91 pp.1199~1211.

Park, J.C., Park, C.M., Kim, B.H., Lee, I.K., Jo, B.W. (2006) Dynamic Characteristics of Seohae Cable-stayed Bridge Based on Long-term Measurements, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 10, pp.115~123.

Ren, W.X., Peng, X.L., Lin, Y.Q. (2005) Experimental and Analytical Studies on Dynamic Characteristics of a Large Span Cable-stayed Bridge, *Eng. Struct.*, 27, 535~548.

Siringoringo, D.M., Fujino, Y. (2009) Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer, *Computer-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 24, pp.249~265.

Stiros, S. (2008) Errors in Velocities and Displacements deduced from Accelerographs: An Approach Based on the Theory of Error Propagation, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 28, pp.415~420.

Kim, J., Kim, K., Sohn, H. (2014) Autonomous Dynamic Displacement Estimation from Data Fusion of Acceleration and Intermittent Displacement Measurements, *Mech. Syst. & Signal Proc.*, 42, pp.194~205.

Kim, K., Choi, J., Koo, G., Sohn, H. (2016) Dynamic Displacement Estimation by Fusing High-sampling Rate Acceleration and Low-sampling Displacement Measurement using Two-stage Kalman Estimator, *Smart Struct. & Syst.*, 17, pp.647~667.

요 지

본 논문에서는 풍산 FNS에서 개발한 force-feedback형 고정밀 국산 3축 가속도계의 성능을 실험적으로 평가하고, 건설 구조물 전산구조해석 및 유지관리용 건진성 모니터링에의 적용성을 논한다. 레이트 테이블 및 가진기를 통해 다양한 형태로 가진실험을 수행함으로써 국산 가속도계의 비선형성, 대역폭, 저주파 신호계측 성능, 바이어스 특성을 검증하고, 국내 가속도계 시장의 대부분을 차지하고 있는 해외 업체들의 대표적 가속도계와 성능을 비교 평가하여 국산 가속도계의 적용성과 시장 진입 가능성을 평가하였다. 실험분석 결과 국산 가속도계는 실험으로 평가한 모든 항목에서 실험에 사용된 수입 가속도계보다 좋은 성능을 보였다. 특히 건설 구조물 계측에 필수적인 저주파 대역 계측성능은 수입 가속도계의 성능을 능가하였으며, 바이어스도 상수 특성을 가장 잘 유지하는 것으로 나타나 향후 실험기반 구조해석 및 구조물 장기 건진도 모니터링에 좋은 대안이 될 것으로 평가된다.

핵심용어 : 강화된 고차전단변형이론, 혼합변분이론, 변위-응력해석, 복합재료 적층평판