Transactions of the KSNVE, 23(12) : 1082~1089, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.12.1082

한국소음진동공학회논문집 제23권 제12호, pp. 1082~1089, 2013
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

압전저항형 멤스센서를 이용한 진동 측정용 3축 센서 시스템의 최적화 설계

Optimum Design of 3-Axis Sensor System for Vibration Measurement Using Piezoresistive type MEMS Sensor

서 상 윤* · 배 동 명† · 이 종 규** · 최 병 근***
Sang-Yoon Seo, Dong-Myung Bae, Jong-Kyu Lee and Byeong-Keun Choi

(Received October 22, 2013 ; Revised November 29, 2013 ; Accepted November 29, 2013)

Key Words : Piezoresistive MEMS Sensor(압전저항형 멤스센서), Vibration(진동), 3-Axis Sensor(3축 센서)

ABSTRACT

3-Axis sensor measurement system is needed for measuring ride quality of elevator. But because 3-Axis piezoelectric accelerometer is expensive. We developed 3-Axis sensor system which is suitable for measuring ride quality of elevator using cheap MEMS sensor. There are two types of MEMS sensor that are piezoresistive and capacitive type. The excellence of piezoresistive type in characteristic of frequency response and noise is confirmed compare to capacitive type as a result of this paper's experiment and reference. 3-Axis system using MEMS sensor needs MEMS's proper frequency response characteristic. Additionally noise characteristic of sensor and circuit, stiffness of assembly are needed for deciding frequency range and accuracy of amplitude.

1. 서 론

승강기에서 발생하는 진동 소음의 상태감시를 하기 위해서는 카내 승차감과 권상기의 진동과 소음을 측정하여 상태를 감시하고 평가할 수 있다. 그 중에서도 카내 승차감을 측정하면 카 및 로프와 레일 등의 설치 상태를 감시할 수 있으며, 권상기에서 발생되는 진동의 특성은 제한된 범위 내에서 분석이 가능하다. 카내 승차감 진동을 측정하기 위해서 기존의 범용 소음진동 장비를 사용할 경우에는 3축 방향 진동 수준을 측정하기 위해서 고가의 3축 센서, 3채널 앰프, 공급전원이 따로 필요하기 때문에 승강기의 카 내에서는 측정의 어려움이 상존한다.

이러한 어려움을 해소하기 위해서는 카 내 승차감을 간편하게 측정할 수 있는 저가의 3축 센서와 배터리로 구동되는 진동 측정 시스템이 필요하다. 저가의 3축 센서 시스템을 구성하기 위해서는 상용 MEMS 센서를 사용한 시스템을 구성하는 것이 적절하다.

MEMS(micro electro-mechanical system) 기술은 유비쿼터스 네트워크나 초소형 휴먼 인터페이스 분

† Corresponding Author ; Member, Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University
E-mail : dmbae@pknu.ac.kr
Tel : +82-51-629-6613, Fax : +82-51-629-6613
* Korea Elevator Safety Technology Institute
** The Dept. of Physics, Pukyong National University
*** The Dept. of Energy and Mech. Eng., Inst. of Marine Industry, GyeongSang National University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

야의 핵심 요소 부품인 3차원 미소구조물, 센서 및 엑츄에이터 등을 소형화, 고정밀화하고 복합화할 수 있는 기술이며, MEMS 기반의 capacitive 타입 진동 가속도계는 최근에 연구개발이 활발하게 이루어져 3축 가속도계가 출시되었고, 기존 압전형 센서 가격의 약 1/100 정도의 저가격화가 실현되어 시장 규모가 폭발적으로 증가하여 2006년도에는 1.7억 개가 판매되고 있는 추세이다[1].

MEMS 가속도계는 capacitive와 piezoresistive 2개의 마이크로 시스템 아키텍처로 구분할 수 있다. 비록 2개의 가속도계 타입은 동일하게 내부의 검증질량(proof mass)이 가속도에 의해 가진되지만, 가속도에 의해 내부 검증질량의 움직임에 연관성을 가지는 신호전달 메커니즘에 있어서는 구조적인 차이가 있다[2].

Capacitive 가속도계는 차분 커패시터를 사용하고, 그 균형(balance)은 검증 질량의 움직임에 의해 방해되어 동작되며, piezoresistive 가속도계는 일반적으로 질량 움직임을 동정하기 위해 센서 하우징에 검증질량을 부착한 굽힘 요소에서 발생된 응력에 의해 동작한다. ADXL iMEMS 시리즈(Analog Device사)와 같은 capacitive 기본의 MEMS 가속도계는 piezoresistive MEMS 센서보다는 많은 상업적인 성공을 거두었다. 이것은 상대적으로 capacitive 가속도계의 아키텍처 특성상 적은 제작비용으로 제작되어 생겨난 결과로 piezoresistive 가속도계는 따라갈 수가 없다[3]. 이것은 piezoresistive 재료가 가지고 있는 온도 계수와 이동 특성이 조심스러운 포장과 보상회로를 필요로 하기 때문에 이러한 비용이 포함되어 생긴 문제이다.

그러나 이처럼 가격적인 면에서 장점을 가지고 있고 상업적으로 성공한 capacitive 타입 MEMS 진동 가속도계는 자동차 충돌시험용이나 스마트폰 등에 주로 사용되고 있으나, 노이즈 특성과 주파수 응답특성이 piezoresistive 타입 MEMS 센서의 특성보다는 좋지 않은 것을 확인하였다.

추가적으로 승강기용 승차감을 측정하는 장비는 몇 가지가 있으나, 사용되는 MEMS 센서의 특성 및 MEMS 센서를 부착하는 지그 구조에 따라 응답특성의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

따라서 이 논문에서는 각 장비 및 논문에서 사용된 piezoresisitve 및 capacitive MEMS 센서의 장·단점을 파악하여 승강기 승차감 측정에 적합한 piezoresistive MEMS 센서를 선정하였으며, 선정된 MEMS 센서에서 측정된 진동을 정확하게 전달하기 위한 구조물을 설계하면서 관심 주파수영역에서의 공진이 발생되어 공진 회피 설계를 하였다. 신호 처리 회로에서 발생될 수 있는 noise 특성을 저감하여 승차감 측정에 적합한 주파수 응답특성을 갖는 센서를 개발하였으며, 최종적으로 가진기를 이용하여 성능검증을 실시하였다.

Fig. 1 Flow chart of sensor circuit

2. 센서 시스템의 구성

개발된 센서의 구조는 Fig. 1과 같이 기준 전압 발생 앰프, 센서부, 증폭 앰프 및 옵셋 앰프로 구성되어있다. 동작 원리를 살펴보면, 우선 배터리를 통하여 전원이 공급되면 센서에 안정적인 전원을 공급하기 위하여 기준전압을 발생시킬 수 있는 소자를 사용하여 5V를 센서에 공급하고, 센서에서 출력된 신호는 gain 소자를 사용하여 원하는 증폭비로 증폭시킨 후 옵셋을 제거하기 위하여 옵셋 소자를 이용하여 3mV까지 옵셋 전압을 제거하여 최종 출력 신호는 AD converter로 입력되도록 구성되었다.

3. 센서 시스템의 성능 비교

서론에서 언급한 바와 같이 MEMS 타입 가속도 센서는 2가지가 있으며, 근래에 반도체 회사에서 개발 및 판매가 많이 이루어지고 있는 capacitive 센서와 실용적인 목적으로 사용이 많이 되고 있는 piezoresistive 센서가 있다. 개발 초기에는 가격적인 면에서 장점이 있는 capacitive 센서를 채택하였으나, 다음과 같은 성능 검증을 통하여 piezoresistive 센서를 채택하였다.

3.1 MEMS 가속도계 사양

개발에 사용된 MEMS 센서 사양은 Table 1과 같다. Piezoresistive 타입은 승강기 승차감 측정 장비인 미국의 PMT사의 EVA-625 장비에서 사용하고

있다[(4)].

이 장비에 사용된 MEMS 센서(measurement specialties, 3022, 3052)는 진동 및 충격 모니터링, modal analysis 등에 사용되며, 개발초기에 적용하였던 capacitive 타입 가속도센서(ADXL001)는 진동 및 충격 모니터링 등에 사용할 수 있다. ADXL001은 시중에 나와 있는 capacitive 타입 MEMS 센서 중 사용 용도가 진동 측정에 적합하도록 제작되었으며, 주파수 응답특성이 가장 우수한 것으로 조사되었다[(5,6)].

주요 특징으로 주파수 범위가 개발에 사용된 센서(3052)가 DC~150 Hz 대역으로 승차감 측정에 사용되는 주요 주파수 대역이며, capacitive 타입 센서인 ADXL001은 22 kHz까지의 광범위한 영역에서 사용할 수 있는 사양을 가졌다. 그리고 noise 레벨은 개발에 사용된 센서가 상대적으로 양호하다.

3.2 테스트 Setup

테스트 장비의 구성은 Fig. 2에 나타나있다. 실험장치는 LDS사의 DACTRON 계측기에 제작된 센서와 Table 2와 같은 범용 센서를 연결시켜 신호를 취득하고, signal generator와 앰프를 사용하여 LDS사의 가진기를 동작시켜 센서에서 나오는 신호를 PC에서 분석프로그램인 RT Pro FOCUS 프로그램을 이용하여 데이터를 취득하고 분석할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

각 센서별 동작을 위해서 범용센서는 ICP 타입 센서이고 2~10 mA의 전류를 공급하면 동작되므로 계측기에 직접 연결하여 전원공급 및 신호 취득을 하고, 자사 개발 센서는 배터리에서 ±12 V를 보드에 공급하여 내부 회로에서 정밀한 센서 전원(5 V)을 공급하여 동작한다. 타사 센서 역시 동일한 5 V를 공급하여 동작하며, capacitive 센서는 정확한 감도인 16 mV/g를 맞추어주기 위해서 5 V 입력을 외부 전원 공급을 하였고, 각 센서의 신호선은 계측기에 연결하여 출력 신호를 취득하였다.

가진기 실험을 위한 센서 부착 방법은 범용센서는 제조사에서 제공되는 자석을 이용하여 부착하였다. 개발된 piezoresistive 센서는 왁스를 이용하여 가진기 면에 부착하였으며, 타사에서 제작된 piezoresistive

Table 1 Comparison of each MEMS sensor's specification

Item	Piezoresistive	Capacitive
Manufacture	Measurement specialties	Analog device
Model no.	3022, 3052	ADXL001
Acceleration range	±2 g	±70 g
Frequency	0-150 Hz	22 kHz
Sensitivity	5.0~9.0	16
Residual noise	1.1 mg rms	85 mg rms
Application	Vibration&Shock monitoring modal analysis Machinery	Vibration monitoring Shock detection Industrial monitoring

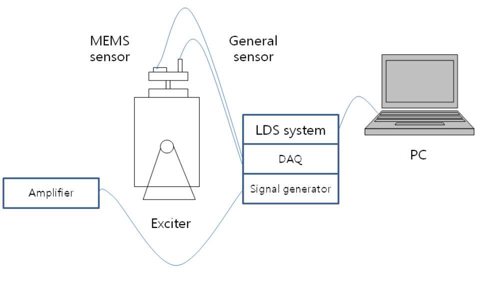


Fig. 2 Test setup

Table 2 Specification of reference accelerometer

Item		ICP
Manufacture		Wilcoxon
Product number		780A
Specification	Max. acceleration	80 g
	Frequency range	1~7,000 Hz
	Sensitivity	100 mV/g
	Electrical noise	500 ㎍ rms
Application		General purpose

Table 3 Specification of test setup

Item	FFT analyzer	Exciter
Manufacture	LDS	LDS
Specification	· Voltage range : ±10 V · Frequency range : up to 42 kHz · Resolution : 24 bit · Dynamic range : 120 dBfs · Accuracy : ±0.08 dB (1 kHz sine at full scale) · Frequency accuracy : 0.01 %	· Amplifier : PA 1000L · Useful frequency range : 5 Hz~ 7.5 kHz · Maximum Acceleration : 117 g · Maximum weight : 82 kg

센서는 bolt를 이용하여 고정하였고, capacitive 센서는 범용센서의 하단부에 왁스를 이용하여 부착하였다.

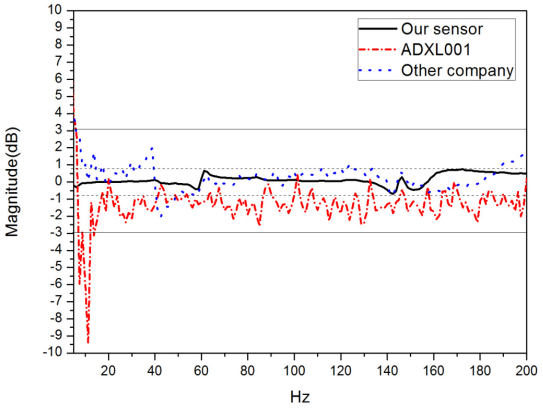


Fig. 3 Frequency response of each sensor(0~200 Hz)

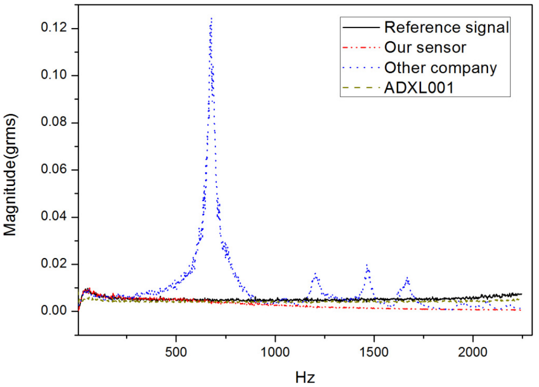


Fig. 4 Frequency response of each sensor(0~2500 Hz)

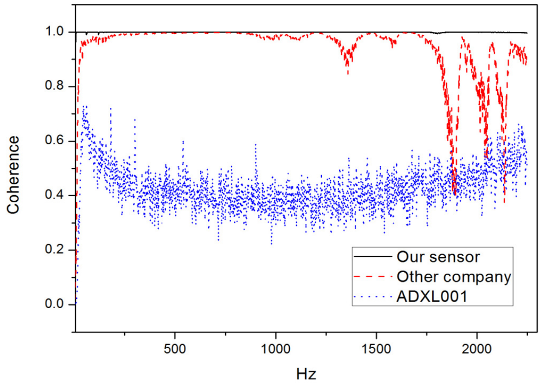


Fig. 5 Coherence of each sensor

3.3 성능 비교

센서의 성능 비교를 위하여 Fig. 2의 실험 장치를 이용하여 성능을 검증하였다. 실험은 Table 1의 2가지 센서에 대해 전주파수 구간의 응답특성을 확인하기 위해서 white noise를 이용하여 전대역 가진을 실시하였다. 신호 취득 방법은 1V의 white noise를 입력신호로 하고 1,000번 평균화하였다. 최대 주파수는 2,000 Hz이고 라인수는 1600 line으로 취득하였다.

기준 센서를 이용하여 주파수 응답특성을 확인한 결과, Fig. 3과 Table 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 자사 개발 센서와 타사 센서는 승차감 측정 및 평가를 위한 주요 주파수 범위인 0~200 Hz의 주파수 범위 내에서 정밀도가 ±3 dB 이내이었고, 자사 개발 센서는 최대 ±10 % 이내의 정밀도를 확보하였으며 평탄도 특성도 좋은 것을 확인할 수 있었다. ADXL001의 경우, 주파수 응답 특성이 균일하지 않은 것은 센서 noise 특성에 의한 영향이다. Fig. 4와 같이 2,000 Hz 내에서 센서의 응답특성을 확인하여 보면, 자사 센서는 기준 센서 대비 약 600 Hz까지 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 타사 센서는 약 600 Hz에서 공진이 발생하고 있고, ADXL001 센서는 400 Hz 이하에서는 응답특성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5와 같이 신호 크기의 유사성을 알려주는 coherence는 자사 개발 센서가 1로서 거의 일치함을 확인할 수 있으며, 그 외 센서는 상대적으로 작게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 4 Magnitude comparison of each sensor

Frequency [Hz]	Our sensor	ADXL001	Other company
	dB [V/V]		
20	-0.01	0.18	0.18
40	0.12	-1.34	-0.08
60	0.21	-1.19	-0.15
80	0.24	-1.88	0.22
100	0.11	-0.73	0.57
120	0.06	-1.84	0.83
140	-0.48	-1.31	0.00
160	0.39	-1.73	-0.63
180	0.61	-1.11	-0.08
200	0.49	0.22	1.64

이상과 같은 결과로부터 자사 개발한 센서가 우리가 사용하고자 하는 승차감 측정 영역인 0~200 Hz 대역에서 진폭정밀도 최대 ±10 % 오차 범위 이내의 성능이 확보된 것을 확인할 수 있다.

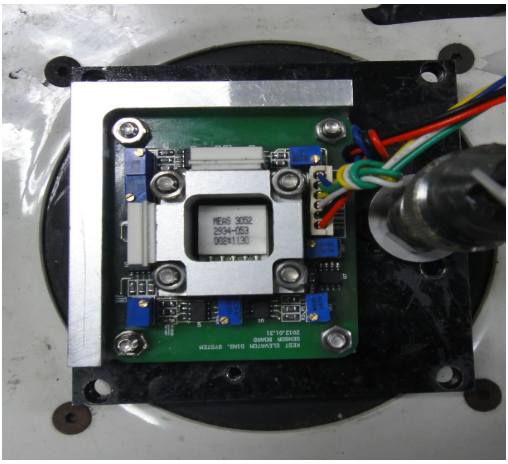
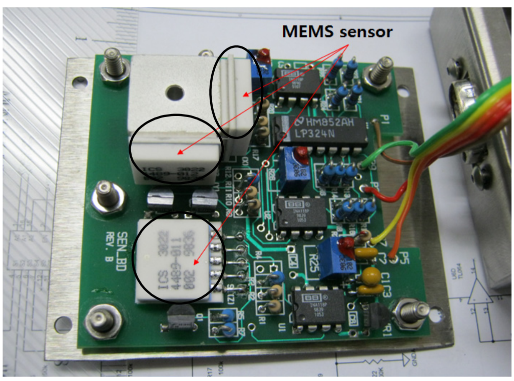
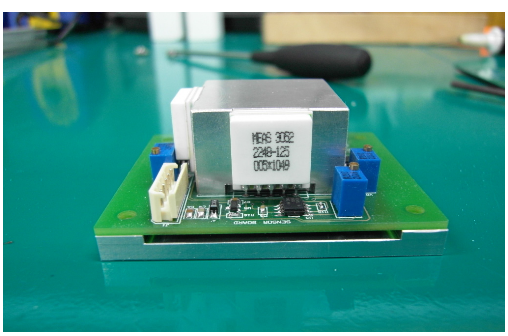


Fig. 6 Configuration of sensor



(a) Other company's sensor structure



(b) Our company's sensor(old model)

Fig. 7 Structure of each sensor

4. 구조물의 진동 해석

개발된 3축 센서의 구조물은 센서의 응답 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 회로는 Fig. 1과 같은 순서로 구성된 회로로 PCB를 제작하였으며, 정확한 신호를 취득하기 위해서는 PCB board 상에서 센서의 부착 형태 및 고정 방법이 중요하기 때문에 Fig. 6과 같이 Z축은 PCB 기판의 중앙부위에서 확인할 수 있는 것처럼 사각형인 MEMS 센서를 직접 PCB에 부착하였고 X, Y축은 구조물을 제작하여 수평방향 진동을 측정할 수 있도록 구조물에 부착하였다. 하지만, 최초 적용된 센서의 구조물은 진동 취득 결과, Fig. 7의 (b)와 같은 PCB와 구조물의 형상, 결합 강도에 의해 인체 진동 측정 영역인 100 Hz 이내의 영역에서 공진이 발생되었다. 또한 타사 센서의 경우에도 장비의 샘플링 유효구간인 200 Hz 이내에서 Fig. 8과 같이 공진이 발생되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 공진발생 원인을 찾기 위하여 ANSYS 프로그램을 이용하여 modal analysis를 실시하였다. 센서 구조물 형태 및 해석 결과는 Fig. 9와 같으며, 해석을 통해 도출된 공진주파수는 Table 5의 (a), (b)이다. Fig. 7(a)과 같이 타사 센서는 PCB를 외곽에서 지지하고 있으며, PCB 중간 부위에 지지부가 없기 때문에 공진주파수가 약 200 Hz와 600 Hz 대역에서 발생하고 있다. 자사 센서는 해석 결과, 약 30 Hz와 350 Hz 대역에서 공진이 발생하여 주요 센서 측정 범위 내에서 공진이 발생하였고, 저주파에서 공진이

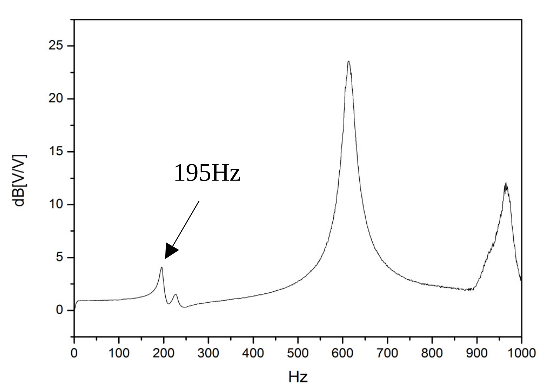
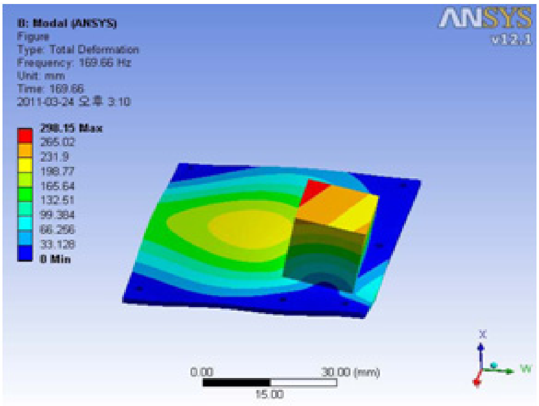
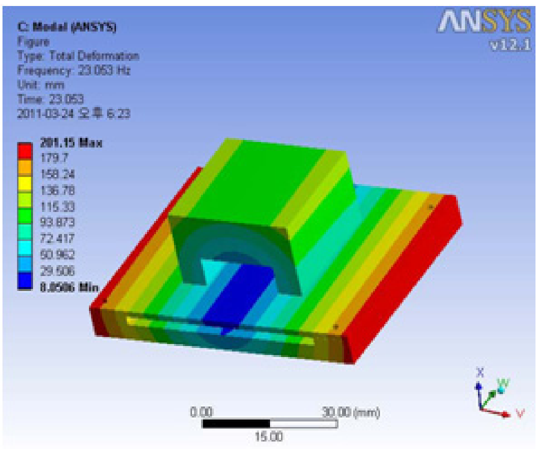


Fig. 8 Frequency response of other company’s sensor



(a) Other company's sensor



(b) Our company's sensor(old model)

Fig. 9 Modal analysis of each sensor

Table 5 Mode frequencies

Order	(a) Other company	(b) Our sensor (old model)	(c) Our sensor (new model)
1st	169.66	0	999.72
2nd	340.88	0	1012.5
3rd	379.4	0	1200.8
4th	446.23	23.053	1235.5
5th	563.27	29.973	2074.6
6th	1075.8	32.198	2123.4
7th	1198.9	345.8	2366.9
8th	1269.7	350.69	2408.6
9th	1427.2	442.15	2456.4
10th	1665.7	453.54	2478.8

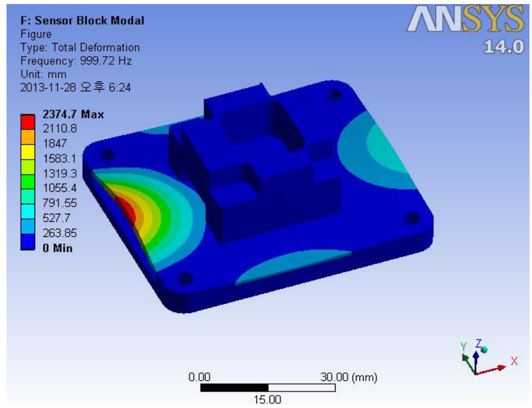
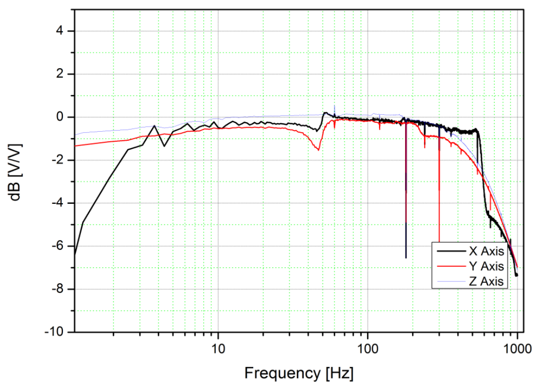
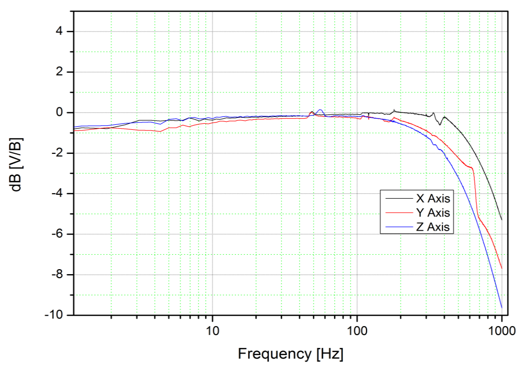


Fig. 10 Modal analysis of our new sensor



(a) Before stiffness change



(b) After stiffness change

Fig. 11 Frequency response change according to connection stiffness

발생하는 이유는 구조물 자체는 고주파수이나 지지강성이 부족하여 저주파영역에서 공진이 발생하는 것으로 확인되어 Fig. 6과 같은 현재의 구조 형태로 변경하여 결합강성을 증가시켰으며, 모드 해

석한 결과는 Fig. 10과 Table 5의 (c)와 같으며, 1차 고유진동수는 999.72 Hz로 측정관심 영역인 200 Hz 이내에서의 응답 특성은 적절한 것으로 확인되었다.

5. 결합 강성에 따른 감도 특성 변화

양산 시 조립된 센서의 응답 특성을 확인을 위해 최종 가진 시험을 실시한 결과, 센서의 응답특성이 Fig. 11과 같이 센서 마다 다른 것이 확인되었다. 그 이유를 확인하기 위해 실험한 결과, 센서 구조물의 특성에 의한 것이었으며 센서 구조물은 하부 평판에 센서를 부착하기 위한 블록과 센서가 부착된 PCB를 고정시키기 위해 4개의 볼트와 너트로 고정시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 일반적으로 3점 지지가 구조물의 지지를 위해서는 가장 안정적인 구조이나 현재 구조물은 4점 지지이기 때문에 구조물의 특성에 따른 변화라고 판단되어 다양한 시료에 대해 시험하고 판단한 결과, 조립 강성의 특성에 따른 것으로 확인되었으며, 최종적으로 최초 Fig. 3의 60 Hz 대역과 140 Hz 대역에서 나타난 변곡점 역시 조립 특성에 의한 것으로 확인되었으며, 조립 특성에 따라 결합강도가 변화되어 센서의 선형 응답 영역의 오차가 변동되는 것을 확인하였다.

6. 결 론

승강기 승차감 측정의 정확도를 확보하고 범용 3축 가속도센서를 대체할 수 있도록 저가형의 MEMS 센서를 사용하여 승차감 측정에 적합한 3축 가속도 센서를 개발하였다. MEMS 센서의 종류는 capacitive와 piezoresistive 타입의 2종류가 있으며, 이 논문의 실험 결과 및 참고문헌[(2)]에서 확인한 결과, piezoresistive 타입의 센서 특성이 capacitive 타입보다 상대적으로 고가이지만 주파수응답특성 및 노이즈 특성이 우수한 것을 확인하였다.

또한 MEMS 센서 선정 시에는 사용목적에 적합한 주파수 범위를 선정하는 것에 추가하여 센서 및 회로의 노이즈 및 구조물 특성과 조립 강성이 센서의 사용범위 및 정확도 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 확인하였다.

References

(1) Son, J. D., Shim, M. C. and Yang, B. S., 2008, Development of MEMS Accelerometer-based Smart Sensor for Machine Condition Monitoring, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 872~878.

(2) Lynch, J. P., Partridge, A., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S. and Carryer, E., 2003, Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring, Journal of Aerospace Engineering, 108-114.

(3) Maluf, N., 2000, An Introduction to Microelectric-mechanical System Engineering, Artech House, Boston.

(4) Physical Measurement Inc, EVA-625, 2013, Available at : http://pmtvib.com.

(5) Son, J. D., 2009, Development of Wireless Smart Sensor for Machines Condition Monitoring Using MEMS Sensors, PhD Thesis, Pukyong National University.

(6) Shim, M. C., 2012, Wireless Condition Monitoring System for Fault Diagnosis of Rotating Machinery: Development and Application, PhD Thesis, Pukyong National University.

Sang-Yoon Seo is a Manager at Research and Development Department at Korea Elevator Safety Technology Institute in Korea. He received his Ph.D. degrees in Sound and Vibration Engineering from Pukyong National University, Korea, in 2013. His research interests include vibration analysis, machine diagnosis and prognosis, thermal imaging and development of sound and vibration equipment.

Dong-Myung Bae is a professor at the department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering in Pukyong National University at Busan, where he has been since 1986. He received the B.S., M.S. and his Ph.D. degrees

from Pusan National University in 1979, 1982 and 1986 respectively. His research interests are in the area of Ship's Vibration and Noise Analysis, Dynamics of Structure, Modal Analysis and Sensitivity Analysis of Vibration.

Jong Kyu Lee received the B.S. degree of Physics from Pusan National University in 1980 and the M.S. and Ph.D. degrees from KAIST in 1982 and 1988, respectively. Since 1986, he is a professor at the department of Physics in Pukyong National University in Busan. His research interests are in the area of Ultrasonic transducer and Acoustic Emission.

Byeong-Keun Choi is an Associate Professor at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. He received his Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pukyong National University, Korea, in 1999. Dr. Choi worked at Arizona State University as an Academic Professional from 1999 to 2002. Dr. Choi's research interests include vibration analysis and optimum design of rotating machinery, machine diagnosis and prognosis and acoustic emission. He is listed in Who's Who in the World, among others.