

구조안전성 평가를 위한 무선 진동 모니터링 시스템 개발

Development of a Wireless Vibration Monitoring System for Structural Health Evaluation

심 보 군*. 이 시 복*. 채 민 성*

Bo-Gun Shim, Shi-Bok Lee and Min-Sung Chae

(2009년 11월 18일 접수 ; 2010년 1월 5일 심사완료)

Key Words : Wireless Monitoring System(무선 모니터링 시스템), Operational Modal Analysis(운전 모드 해석), Structural Health Monitoring(구조물 건전성모니터링)

ABSTRACT

Wired monitoring systems have been used for damage detection and dynamic analysis of large structures(bridges, dams, plants, etc.). However, the real-world applications still remain limited, mainly due to time and cost issues inherent to wired systems. In recent years, an increasing number of researchers have adopted WSN(wireless sensor network) technologies to the field of SHM(structural health monitoring). Accurate time synchronization is most critical for the wireless approach to be feasible for SHM purpose, along with sufficient wireless bandwidth and highly precise measuring resolution. To satisfy technical criteria stated above, a wireless vibration monitoring system that uses high-precision MEMS(micro-electro-mechanical system) sensors and A/D convertor is discussed in detail. It was found experimentally that the level of time synchronization fell within 200 μ sec.

1. 서 론

성수대교 붕괴사고 이후 대형 구조물의 안전성 평가에 대한 관심이 증가하였으며 안전성 평가를 위해 실시간 모니터링을 적용한 사례로는 남해대교, 진도대교, 영종대교 등이 있다. 특히, 영종대교의 경우에는 광케이블을 이용하여 393개의 센서를 설치하여 교량 구조물의 상태를 판별할 수 있는 시스템을 구축하고 구조물의 변형, 진동특성 변화와 온도에 따른 구조물의 거동을 실시간으로 분석하고 있다⁽¹⁾.

그러나 이렇게 유선을 사용한 방법은 많은 수의 센서를 데이터 수집 장치와 연결하기 위하여 많은 시간과 비용이 소요되는데 전체 비용의 약 25%가

량이 케이블 설치 비용으로 소요되며 전체 설치 시간의 약 75%가 케이블 가설 시간으로 소요되는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 또한 센서와 데이터 수집 장치의 길이가 길어짐에 따라 외부로부터의 전파 간섭 및 신호 왜곡의 문제가 발생하게 되어 측정의 신뢰성에 악 영향을 미친다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 무선 센서 네트워크를 이용한 무선 모니터링 시스템이 연구되고 있으며, 무선 측정 장치에서 고려해야 할 중요한 요소는 무선 도달 거리 및 데이터 전송용량, 각 측정 장치간의 시간동기화 등이다⁽³⁾.

무선 측정 장치의 개발에 있어서 사용할 수 있는 무선 통신 방식은 제한적이며 사용 목적에 따라 적합한 무선 통신 방식이 선정되어야 한다. 근거리 이며 낮은 데이터 전송용량이 필요한 경우에는 지그비(zigbee)나 블루투스(bluetooth) 등을 적용하는 것이 효과적이며 저 전력 소자를 활용한 많은 종류의 장

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 기계공학부, RIMT

E-mail : sblee@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2315, Fax : (051)514-7640

* 삼성엔지니어링 기술연구소

치들이 연구 및 개발되어 있다⁽⁴⁾. 하지만 이러한 방식은 진동 측정과 같이 많은 데이터량을 실시간으로 전송해야 하고 센서의 수가 많은 경우에는 적합하지 않다⁽⁵⁾.

대형 구조물의 경우에는 측정 장치간의 거리가 넓어서 지그비나 블루투스의 통신 도달 거리로는 한계가 있다. 또한 진동의 크기가 크지 않기 때문에 A/D 변환기의 성능이 높은 것을 사용해야 하므로 단위 시간당 전송해야 할 데이터의 양이 커지기 때문에 충분한 데이터 전송용량이 보장되어야만 한다.

이 논문에서는 충분한 무선 전송 거리를 가지며 다수의 측정장치를 수용할 수 있는 넓은 데이터 전송용량을 가진 무선 방식으로 무선 LAN(IEEE 802.11 a, b, g)을 선택하였고 무선 영역 확장이 용이한 무선 메시 네트워크를 적용하였다.

무선을 이용하여 구조물의 동적 거동을 파악할 경우에 있어서 가장 중요한 것은 각 측정 장치간의 시간동기화이다.

기존의 프로토콜을 이용한 시간동기화 방법으로 NTP(network time protocol)을 근간으로 하는 여러 방식들이 있는데 이것들은 주로 서버와 측정 장치간의 상호 통신을 통하여 측정 시간오차를 줄이는 방법이다⁽⁶⁾. 그러나 이러한 방식은 측정 장치가 많아질수록 제한적인 데이터 전송용량을 잠식하여 실제 측정된 데이터를 보낼 때 장애를 유발시킨다. 또한 지속적으로 상호 통신해야 하므로 측정장치의 CPU에 부하를 주게 되는 단점이 있다.

다른 방식으로는 중앙의 타임 서버가 비콘(beacon)을 브로드캐스팅하는 방식이다. 이 방식은 네트워크의 상황에 따라서 비콘의 전달이 안될 경우도 있는데 이를 방지하기 위해서 측정 장치는 자신이 브로드캐스팅된 비콘을 받았는지의 여부를 중앙의 타임 서버에 응답하도록 되어있다. 이 방식은 센서의 수량이 많아 지더라도 데이터 전송용량에 영향이 없고 각 측정장치의 CPU에 부하를 주지 않는다.

시간동기화에 있어서 스위칭 허브(switching hub)나 액세스 포인트(access pointer), 브릿지(bridge)간의 호핑(hopping)상에서도 시간 지연이 발생하며 CPU에서도 시간 지연이 발생할 수 있다. CPU에서의 시간 지연을 최소화하기 위해서는 동작 속도가 높은 CPU를 사용하고 프로그램을 최적화해야 한다.

이 논문에서는 리눅스(Linux)를 측정 장치의 운

영체제로 사용하여 TCP/IP 통신상의 브로드캐스팅 신호를 커널(kernel)에서 감시하도록 하여 CPU상에서의 시간 지연을 최소화 하도록 구현하였으며 하드웨어적으로 별도의 시간동기화를 위한 RF 모듈을 사용하여 측정 데이터의 전송용량에 전혀 영향을 주지 않는 방식을 구현하여 각 장치의 시간동기화 성능을 비교하였다.

2. 시스템의 구성

무선 진동 모니터링 시스템은 Fig. 1과 같이 주제어 PC, 측정장치, 타임서버로 구성되어 있다.

주제어 PC는 타임서버와 각 측정 장치와의 통신을 통하여 측정된 진동신호를 수집하고 각 측정 장치에 명령을 내리는 역할을 하며 타임서버는 각 측정장치에 시간동기를 위한 신호를 브로드캐스팅하고 각 측정 장치가 주제어 PC에 자신의 ID를 등록할 수 있도록 주제어 PC의 IP 주소와 포트 번호를 제공한다.

네트워크상에서 다른 서브넷(subnet)을 가지는 각 측정장치들은 각각의 서브넷에 설치된 타임서버에 의하여 전체적인 시간동기가 가능하다.

전체는 무선으로 구성되며 서브넷간의 무선 연결을 위해서 무선 메시 네트워크 브릿지를 이용한다. 무선 네트워크용 브릿지의 특징으로는 브릿지간의 통신은 다른 주파수 대역을 사용하고 브릿지하부는 IEEE 802.11 a, b, g 규격을 사용하여 일반적인 무선 LAN 기기들과 호환된다.

무선 메시 네트워크의 특징은 대역폭이 넓은 무선 LAN을 기반으로 하면서 다중호핑(multi-hop)이 가능하여 넓은 지역을 효과적으로 관리할 수 있다⁽⁷⁾.

2.1 측정장치의 구성

측정 장치는 크게 센서 모듈과 프로세서 모듈로

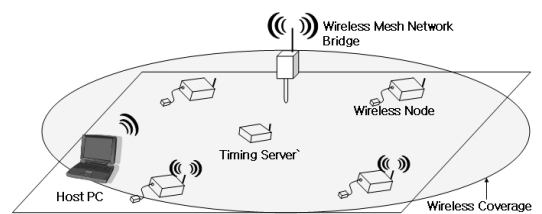


Fig. 1 System configuration

나눌 수 있는데 센서 모듈은 3축 MEMS형 가속도계와 온도센서, 자기장 센서가 포함되어있으며 고성능의 AD 변환기가 포함되어 있다.

센서 모듈과 프로세서 모듈의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

센서 모듈에서 A/D를 함으로써 아날로그구간을 최소화하여 노이즈의 영향을 최소화 하였고 센서 모듈을 완전 shield시켜 외부의 전파에 의한 간섭을 차단하도록 하였다.

프로세서 모듈은 CPU와 배터리, FPGA (flexible programmable gate array)를 포함하고 있으며 센서 모듈과 프로세서 모듈의 블록 선도를 Fig.2에 나타내었다.

(1) 센서 모듈

3축 MEMS센서에서 측정된 신호는 센서 모듈내의 A/D 변환기인 ADS1278에서 디지털 신호로 바뀌어 디지털 통신 방식인 I2C 방식으로 프로세서 모듈의 FPGA로 전송되며 명령에 의하여 샘플링 주파수를 50 Hz, 100 Hz, 250 Hz, 1 kHz로 설정할 수 있다. 또한 MEMS 센서의 특징인 DC 오프셋(offset)을 이용하여 각 X, Y, Z축을 담당하는 MEMS 센서의

기울기를 측정할 수 있고 자기장 센서를 이용하여 지구 자기장의 방향을 파악하여 각 센서들을 구조물에 설치할 때 발생하는 기준 방향에 대한 오차를 보정할 수 있도록 하였다.

Fig. 3에 센서 모듈과 3축 MEMS 센서를 나타내었다.

(2) 프로세서 모듈

프로세서 모듈에는 리눅스를 운영체제로 사용하는 32bit CPU와 센서 모듈을 제어하기 위한 FPGA가 있으며 외부와의 통신을 위해 USB 포트를 가지고 있다. 이 USB 포트에 USB type의 무선 LAN 카드나 CDMA카드를 사용할 수 있게 하였고 센서 모듈에서 변환된 신호는 디지털 신호 형식으로 프로세서

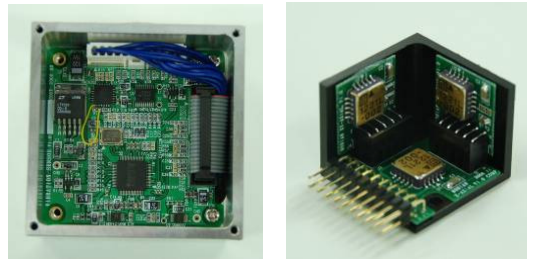


Fig. 3 Sensor module & 3 axes MEMS sensor

Table 1 Specifications of system

| | |
|------------------|---|
| Sensor module | <ul style="list-style-type: none"> · MEMS sensor(3 Axes) - Sensitivity: 2000 mV/g - Noise level : $5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ - Frequency Range: 0~400 Hz · A/D converter - Resolution: 24 bit - Sampling rate: 54 KSPS |
| Processor module | <ul style="list-style-type: none"> · Processor - ETRAX100LX(32 bit) · FPGA - LogicElements: 8256EA |

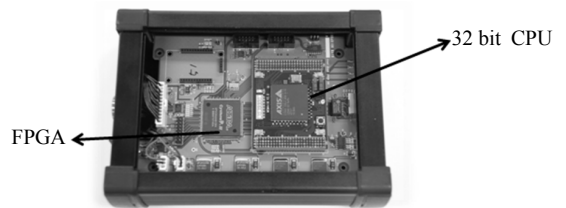


Fig. 4 Processor module

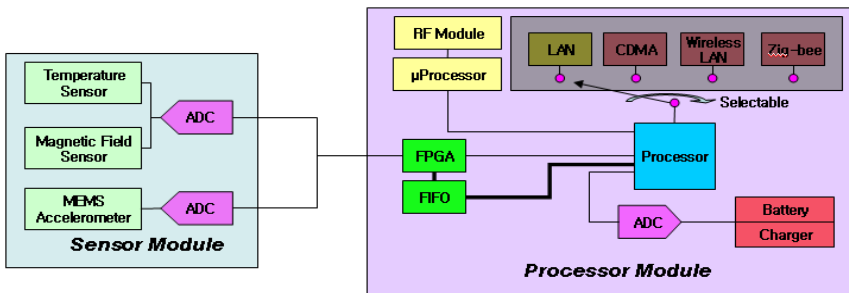


Fig. 2 Block diagram of measuring device

모듈의 FPGA와 연결되고 FPGA에서는 FIFO 메모리에 데이터를 저장한다.

CPU는 FIFO 메모리로부터 데이터를 읽어와서 정해진 데이터 형식으로 변경한 후 TCP/IP 통신을 통해 주제어 PC에 전송한다.

그러나 측정 장치의 수량이 많을 경우, 실시간 측정 데이터를 모두 전송하게 되면 데이터 전송용량이 증가하여 통신상의 충돌로 인한 재전송 등의 지연시간이 발생될 가능성이 커지게 되므로 정해진 시간 동안 측정된 데이터를 측정장치의 CPU에서 FFT하여 그 결과만을 전송하는 방식을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.

(2) 타임 서버

타임 서버는 자신이 속한 서브넷의 각 측정 장치들에게 시간 동기 신호를 브로드캐스팅하는 역할을 하여 전원이 들어오면 정해진 주제어 PC의 IP로 접속을 요청하도록 하여 부득이하게 리셋(reset)이 된 경우에도 자동으로 주제어 PC와의 연결을 통해 재접속이 가능하도록 하는 역할을 한다.

각 측정장치에 전달되는 브로드캐스팅 신호에는 주제어 PC에서 설정된 샘플링 주파수 및 측정 시간 등의 정보가 포함되어 있다.

2.2 소프트웨어의 구성

주제어 PC의 데이터 수집 및 측정 장치 제어를 위한 프로그램은 Visual C++로 프로그램 되었으며 각 측정 장치로부터 측정된 데이터를 실시간으로 FFT하고 저장 및 재생하는 기능을 가지고 있다. FFT 설정조건으로 오버랩지정, 윈도우설정, 각

그래프에서 가속도, 속도, 변위 변환 기능과 특정 시작값(threshold)를 지정하고 이를 넘을 경우 경고를 울리며 그 상황을 별도의 파일로 저장하는 기능을 가지고 있다.

무선 측정 장치 시스템의 시간동기화 및 통신에 대한 상태도를 Fig. 5에 나타내었다.

3. 실험 및 검증

3.1 측정 정밀도

MEMS 센서의 측정 정밀도를 주파수 별로 확인하기 위하여 기존의 구조물 진동 측정용 센서인 압전형



Fig. 6 Equipment for exciter test

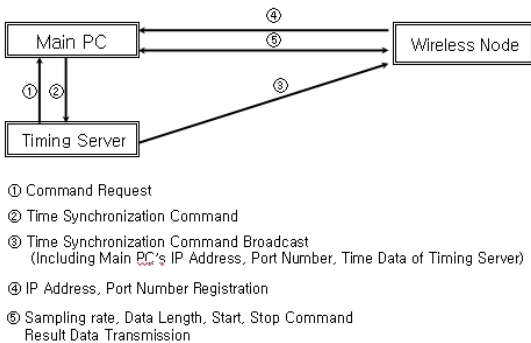


Fig. 5 State diagram for synchronization and communication

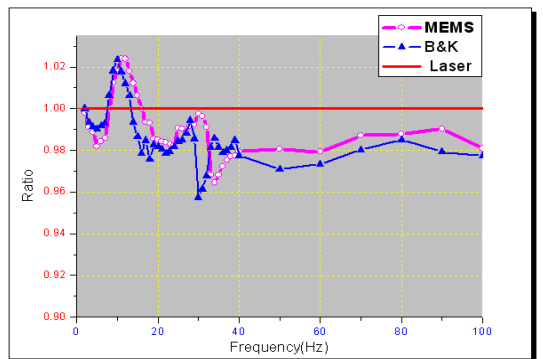


Fig. 7 Results of the accuracy test

가속도 센서(B&K 8340)와의 비교 실험을 Fig. 6과 같이 구성하여 실시하였다. 가진기는 B&K사의 4825를 사용하였고 주파수는 2 Hz ~ 100 Hz까지 가진 하였으며 40 Hz까지는 1 Hz 단위로 가진 하였고 100 Hz까지는 10 Hz 단위로 가진 하였다.

주파수 별로 일정한 가속도로 가진 하는 것이 어렵기 때문에 레이저 변위계를 기준값으로 하여 각 주파수에 따라 레이저 변위계의 값과 두 센서의 값을 측정하여 각 센서에서 측정된 값과 레이저 변위계에서 측정된 값의 비를 구하여 Fig. 7에 나타내었다.

측정 결과 MEMS형 센서는 각 주파수 별 레이저 변위계의 결과와의 비가 제곱평균 값으로 0.96, 표준편차가 0.03이고 압전형 센서의 경우는 제곱평균값이 0.93, 표준편차가 0.06으로 측정 되었다.

MEMS형 센서가 약 3.2% 정도 개선된 것으로 나타났다. 이 결과를 통하여 MEMS형 센서가 압전형 센서보다 주파수 별 선형성이 비교적 좋다는 것을 확인하였고 값 비싼 기존의 구조물 진동 측정용 센서를 대체할 수 있다는 것을 확인하였다.

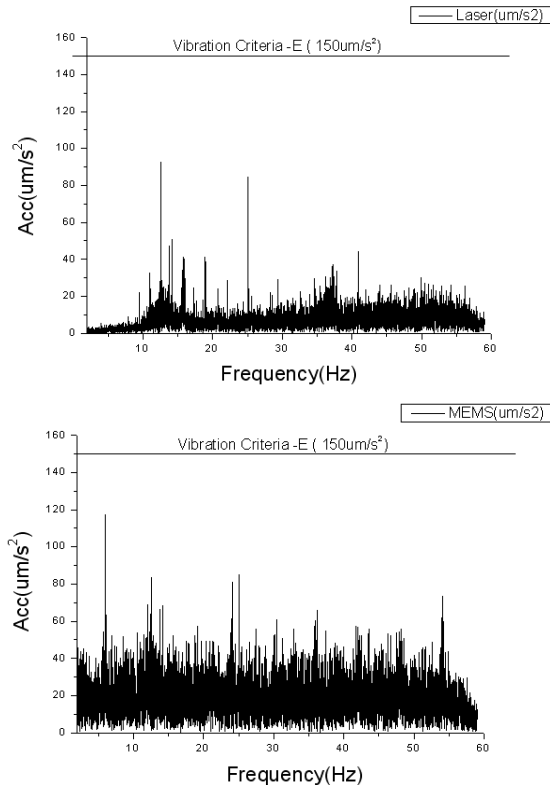


Fig. 8 Results of dynamic range test

3.2 동적 측정 범위 검증

최소 측정 가능한 진동크기를 측정하기 위하여 큰 질량을 가지는 지하 주차장의 바닥에서 실험을 수행 하였으며 레이저 변위계와의 비교 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

측정결과 최소 측정 가능 진동 크기가 반도체 공장 등의 정밀 진동기준에 적용하는 진동기준으로 (VC-E, 150 $\mu\text{m}/\text{s}^2$)이하로 측정 되었다⁽⁸⁾.

3.3 시간동기화

시간동기화 측정을 위해서 Fig. 9와 같이 Agilent 사의 Logic Analyzer 1682AD를 이용하여 실험을 수행하였다. 두 개의 무선 노드에서 시간동기화 브로드캐스팅을 수신하면 지정된 I/O 핀으로 신호를 출력하도록 하여 Logic Analyzer에서 두 무선 노드

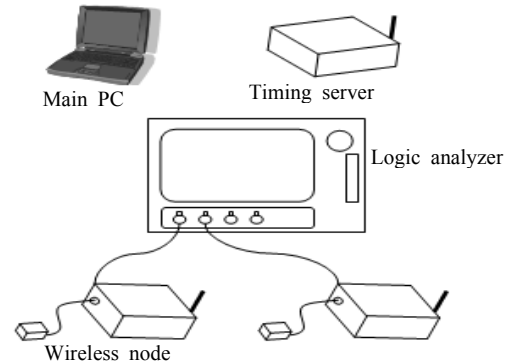


Fig. 9 Configuration of time synchronization test

Table 2 Results of time synchronization test

| | Wireless LAN | RF module |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| Number | Synchronization error[μsec] | Synchronization error[μsec] |
| 1 | 38.66 | 94.86 |
| 2 | 38.28 | 33.25 |
| 3 | 44.53 | 6.25 |
| 4 | 50.26 | 14.06 |
| 5 | 39.79 | 20.31 |
| 6 | 23.90 | 29.13 |
| 7 | 31.74 | 23.29 |
| 8 | 26.63 | 12.96 |
| 9 | 27.46 | 5.01 |
| 10 | 128.3 | 37.72 |
| Average | 44.95 | 27.68 |

에서 보내는 신호의 차이를 10회 측정하였다. 또한 RF 모듈을 사용하여 시간동기화를 구현하였을 경우에 대해서도 10회 실험을 수행하였다.

그 실험결과를 Table 2에 나타내었으며 무선 LAN의 경우에는 최대 128 μsec , 평균 45 μsec 의 측정 장치간 시간오차가 발생하였고 RF 모듈을 사용하였을 경우에는 최대 94 μsec , 평균 28 μsec 의 시간오차가 있음을 알 수 있었다. 무선 LAN의 경우보다 RF 모듈에서의 시간오차가 더 작게 나타났으나 그 차이가 크지 않음을 알 수 있었으며 대형 구조물의 경우에는 그 고유진동수가 크지 않기 때문에 대략 200 μsec 의 시간오차라면 진동 해석 시의 위상 오차가 크지 않고 모드형상을 정확히 표현할 수 있을 것으로 예상되었다.

4. 결 론

자연 가진 기법을 이용하여 대형 구조물의 진동해석을 수행하기 위한 무선 진동 측정 시스템을 개발하였다. MEMS형 가속도센서를 이용하여 무선 LAN을 통해 통신하도록 설계 하였으며 노이즈를 최소화하기 위해 센서 부에서 A/D변환을 수행하여 아날로그구간을 최소화 하였다. 또한 무선을 이용한 진동 측정에 있어서 매우 중요한 시간동기화를 브로드캐스팅방법을 통해 구현하였다. 주파수 별 측정값의 선형성을 레이저 변위계를 기준으로 기존의 압전형 센서와 비교하여 구조 진동용으로 적합함을 확인하였고, 시간동기화에 대한 관련 실험을 통하여 200 μsec 이하로 시간동기가 이루어짐을 확인하였다. 또한 진동 측정이 가능한 최소 레벨에 대한 실험을 통하여 최소 측정 가능 레벨은 약 130 $\mu\text{m}/\text{sec}^2$ 임을 알 수 있었다. 이러한 실험결과를 바탕으로 개발한 무선 진동 측정장치는 대형구조물의 진동해석을 통한 구조물 안전성 평가에 매우 적합하다는 것을 확인하였다.

향후 과제로는 실증 현장 적용시험과 스트레인 게이지센서 적용 및 FEM 해석 결과와의 비교를 통해 손상검출 알고리즘에 대한 연구를 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

(1) Kim, S. K., 2006, "Signal Analysis from a Long-term Bridge Monitoring System in Yong jong Bridge," Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 6, pp. 9~18.

(2) Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S., 1998, "A Modular Wireless Damage Monitoring System for Structures," Report No. 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

(3) Hwang, J. H. and Park, J. H., 2003, "A Conceptual Design for the Development of a Remote Structural Monitoring System," Journal of the Institute of Construction Technology, Vol. 22, No. 2, pp. 260~269.

(4) Son, J. D., 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.

(5) Lee, J. S., 2007, "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee and Wi-Fi," The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society(IECON), Taiwan.

(6) Bin, B. U and Lee, J. H, 2007, "A Scheme to Reduce the Transmission Delay for Real-time Applications in Sensor Networks," The Journal of the Korean Institute of Maritime & Communication Sciences, Vol. 11, No. 8, pp. 1493~1499.

(7) <http://www.strixsystems.com>

(8) Colin G. Gordon., 1999, "Generic Vibration Criteria for Vibration Sensitive Equipment," Proceedings of International Society for Optical Engineering(SPIE) Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical System, Denver, CO.