

지진재해 대비 정밀 FAB. 구조물의 모니터링 시스템 설계

이현준*, 송원길*, 이경오**

*알엠에스 테크놀로지(주)

**선문대학교 컴퓨터공학과

e-mail : rmstech@rmstech.co.kr, leeko@sunmoon.ac.kr

A Design of seismic monitoring system for Ultra Precision FAB. Structure

Hyun-Jun Lee*, Won-kil Song**, Kyong-Oh Lee*

*Lab. of RMS Technology Co., Ltd.

**Dept. of Computer Engineering, Sun-Moon University

요 약

산업발전에 따라 초정밀 가공/생산/검사 장비를 설치, 운용하는 FAB. 구조물의 건축이 증대되고 있으며, 이에 따라 건물의 환경진동 규제치도 강화되고 있는 실정이다. 한국은 일본이나 동남아 국가들과는 달리 지진에 대한 피해가 직접적으로 보고 되고 있지는 않지만, 동일본 지진에서와 같이 인접국가의 대규모 지진은 초정밀 장비의 작동에 심각한 영향을 준다. 따라서, 본 논문에서는 대규모 지진에 영향을 받는 일반 건물과 미세한 지반 진동에도 영향을 받는 정밀 FAB. 에서 운용이 가능한 범용적인 지진재해 대비 모니터링 시스템의 설계에 대해 서술한다.

1. 서론

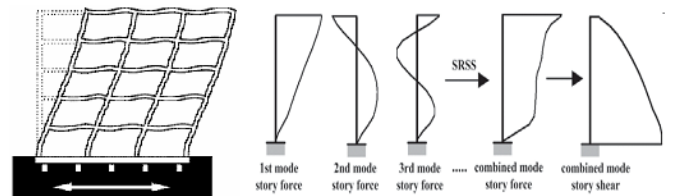
산업발전에 따라 초정밀 장비를 운영하는 정밀 FAB. 뿐만 아니라, 주거용 건물이 고층화됨에 따라 돌풍/태풍 혹은 중량물의 이동, 단체 운동 등으로 인해 발생한 소규모 진동에 대한 민원사태가 점차 증가하고 있다. 또한, 고층건물에는 다수의 인원이 상주하므로 지진과 같은 대규모 진동이 건축물의 구조 안정성에 미치는 영향에 대한 관심도 높아지고 있다. 2009년 제정된 지진재해대책법에 의해 국가 주요시설과 50층 이상의 고층건물 등에 지진계측시스템 설치 의무화됨에 이에 관한 수요가 증가하고 있다. 사회가 발전할수록 진동에 대한 민원이 증가할 것이고, 이에 따라 진동모니터링의 시장규모 또한 확대될 것으로 예상된다. 삼국사기부터 조선왕조실록의 역사자료를 분석해보면, 서기 1년부터 현재까지 2,000건이 넘는 크고 작은 지진이 우리나라에서 발생해 왔다는 것을 알 수 있다[3]. 특히 이 가운데 진도 VII을 넘어서는 강한 지진이 발생한 것은 총 194회로서 우리나라에서도 대규모 지진이 발생할 가능성이 충분히 높다고 할 수 있다. 이에, 본 논문에서는 지진 재해를 대비한 진동 모니터링 시스템에 대해 기술한다.

2. Eigen value/Eigen Vector 에 의한 지반 진동

의 건물 증폭효과 분석

지진에 의해 생성된 지반진동은 건물에 전달되면, 건물은 고유의 동역학적 특성에 따라 반응한다[1]. 일반적인 건축구조물은 다양한 고유진동 모드를 가지고

있으며, 각각의 고유진동 모드의 응답을 합쳐서 구조물의 전체 진동이 결정된다. 건물의 진동해석은 간략화된 MDOF(Multi Degree Of Freedom) 이산시스템으로 접근한다[1].



(그림 1) MDOF(Multi Degree Of Freedom) System

이산시스템 MDOF 방법에선 대상 건축물의 건물 바닥 전체를 강체로 보고, 기둥을 스프링 등으로 단순화시켜 진동응답을 해석한다[2]. 이 방법은 대상물을 이산시스템으로 간략화 하는 것으로서, 연속시스템에 비해 해석의 정확도는 떨어진다. 하지만, 비교적 단기간에 시스템의 응답 특성을 파악할 수 있고, 의미를 갖는 수학적 해석을 사용하므로, 시스템의 동적 특성의 경향성 빠른 시간 내에 파악할 수 있다.

지반 가속도 a_E 가 건물에 전달되었을 때, 건물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -MRa_E \quad (1)$$

여기서 M 은 질량 행렬, C 는 감쇠행렬, K 는 강성행렬이고, $R=[1 \ 1 \ \dots \ 1]$ 이다.

$$\mathbf{x}(t) = \Phi \mathbf{y}(t) \text{라고 하면}$$

$$\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \dots \ \phi_n] \quad (2)$$

$$M\Phi\ddot{\mathbf{y}}(t) + C\Phi\dot{\mathbf{y}} + K\Phi\mathbf{y} = -MR\mathbf{a}_E$$

(2)식에 Φ' 를 곱하면, 식(3) 과 같이 직교관계가 성립한다.

$$\Phi' M\Phi\ddot{\mathbf{y}}(t) + \Phi' C\Phi\dot{\mathbf{y}} + \Phi' K\Phi\mathbf{y} = -\Phi' MR\mathbf{a}_E \quad (3)$$

(3)식에서 다음과 같이 표현하면

$$\Phi' M\Phi = M^*, \ \Phi' C\Phi = C^*, \ \Phi' K\Phi = K^* \quad (4)$$

i 번째 고유벡터(eigen vector)에 대해 식(5)가 성립한다.

$$\begin{aligned} \phi_i' M \phi_i &= m_i^* \\ \phi_i' C \phi_i &= c_i^* \\ \phi_i' K \phi_i &= k_i^* \end{aligned} \quad (5)$$

(3)식에 포함된 n 개의 모드(Mode)는 모두 직교성을 가지므로, i 번째 모드는 단자유도(SDOF, Single Degree Of Freedom) 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$m_i^* \ddot{y}_i + c_i^* \dot{y}_i + k_i^* y_i = -\phi_i' MR\mathbf{a}_E$$

$$\ddot{y}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -\frac{\phi_i' MR}{\phi_i' M\phi_i} a_E = -\Gamma_i a_E \quad (6)$$

$$\Gamma_i = \frac{\phi_i' MR}{\phi_i' M\phi_i} \quad (i \text{ 번째 모드 가중치})$$

감쇠행렬이 0 인 경우

$$\ddot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -\frac{\phi_i' MR}{\phi_i' M\phi_i} a_E = -\Gamma_i a_E \quad (7)$$

Laplace 변환을 거치면 식(8)과 같이 표현 된다.

$$s^2 Y_i(s) + \omega_i^2 Y_i(s) = -\Gamma_i A_E(s)$$

$$(s^2 + \omega_i^2) Y_i(s) = -\Gamma_i A_E(s) \quad (8)$$

$$\frac{s^2 Y_i(s)}{A_E(s)} = -\Gamma_i \frac{s^2}{(s^2 + \omega_i^2)}$$

상대변위 $x(t)$ 와 Mode 응답 $y(t)$ 는 식(9)를 만족한다.

$$\mathbf{x}(t) = \Phi \mathbf{y}(t) \quad (9)$$

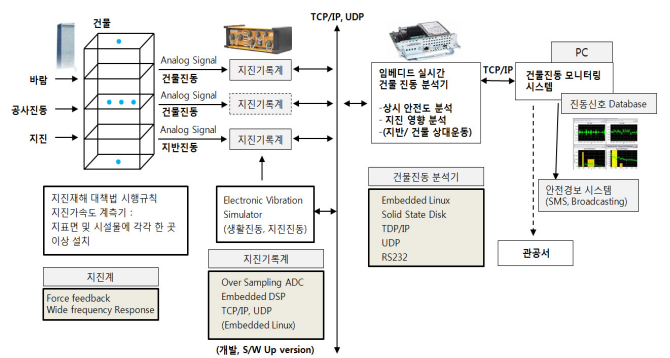
따라서, 절대 변위 $z(t)$ 는 식(10)과 같이 결정된다.

$$z(t) = x(t) + b(t) \quad (10)$$

3. 지진재해 대비 건물 모니터링 시스템 개요

지진 재해 대비 건물진동 모니터링 시스템의 구성 개요는 그림 2 와 같다. 지표면과 시설물에 설치된 가속도센서는 바람, 공사진동, 지진 등의 진동원에 따른

진동을 전압 혹은 전류 신호로 변환하여 지진기록계에 전달한다. 지진기록계는 지진가속도 신호를 아날로그 신호처리/오버샘플링 기법을 사용한 아날로그 디지털 변환/디지털 신호처리 과정을 거쳐 드리프트가 보상된 양자화 가속도 신호와 속도 신호등을 생성하고, 주파수 스펙트럼을 계산하여 TCP/IP, UDP 등의 통신수단을 이용해서 실시간 진동분석장치로 전송한다. 실시간 진동분석장치는 지반진동과 건물진동의 상호연관성을 분석하여 상시안전도 진단에 필요한 등가강성과 지진 안전도 진단에 필요한 전단력(Shear Force) 등을 계산하고 주파수 응답등을 연산하여 TCP/IP 등의 통신으로 모니터링 시스템에 전달한다.



(그림 2) 지진재해 모니터링 시스템의 구성 개요

지진 재해 대비 건물진동 모니터링 시스템의 세부 개발 구성품과 소요되는 기술은 다음과 같이 4 개의 영역으로 나누어 볼 수 있다.

no	기술명
1	고성능 서보형 가속도 지진센서
2	지진 기록계
3	실시간 건물 진동 분석기
4	건물진동 모니터링 시스템/안전경보 시스템

본 논문에서 제안하는 시스템의 사용 센서는 Force Feedback, Capacitive pick-off, 고성능 전류 드라이버를 갖추고 있어야 하며, 120dB 이상의 동적영역을 갖는 광대역 서보형 지진 가속도계이다. 지진기록계는 Over Sampling 에 의한 저 잡음, High Dynamic Range ADC(Analog Digital Converter) 를 갖추고 있어야 하며, Linear / Minimum phase FIR(Finite Impulse Response) Filter 가 필요하다. 또한, floating-point 연산 기능의 Embedded DSP(Digital Signal Processor) 와 고정도 기준 시간 (Precision Time Base), TCP/IP, UDP 등의 Ethernet Communication 프로토콜을 지원한다.

실시간 건물 진동 분석기는 주어진 시간 내에 지진기록계로부터 수신 받는 신호를 분석한다. 이를 위해서는 가속도 신호의 주파수 영역 변환 (FFT-Fast Fourier Transformation)이 우선되어야 하며, 지반의 진동과 건물의 진동을 구별하여 위치 별 상대진동을 측정 (주

파수/시간영역, 지반/건물내층, 건물내층/옥상 등)한다. 또한, 건물 진동주파수 분석에 따른 등가 강성 연산을 수행하며, 이를 데이터 베이스 서버로 전송하기 위한 TCP/IP, UDP 등의 Ethernet Communication 프로토콜을 가지고 있어야 한다. Embedded 기반의 독립 시스템의 외형을 갖고 저전력 Cortex Arm Processor 와 Embedded Linux (Kernel Version 2.6.35 이상) OS 로 구성된다. 건물 진동분석기를 통해 분석이 완료된 데이터 들은 건물진동 모니터링 시스템/안전경보 시스템으로 전송된다. 이 시스템에서는 가속도 신호의 DataBase 관리(시간영역, 주파수 영역)가 이루어지며, 건물 주요 구조 DataBase 관리(건물 형상, 중량, 기준 강성, 최대 전단력 등) 및 주요(지반/ 건물 가속도, 속도 등) 진동 데이터 전시를 수행한다. 또한, 이상 신호 발생시 BMS(Building Management System)과의 연계로 건물내 방송/ 외부기관으로의 정보 전달 등을 수행한다.

4. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 효과적인 지진 모니터링 시스템의 구축 방법에 대해 설명하였다. 지진이 일어나면 지진의 크기(해당 건물이 위치한 지역의 진도)에도 영향을 받지만, 지진의 주파수에 의한 영향이 더 크다[4]. 지진파와 같은 진동수를 가진 건물은 다른 건물보다 더 심하게 흔들려 무너질 가능성이 커진다. 지진진동이 건물의 고유진동수와 일치할 때 공진에 의해 증폭되기 때문이다. 1985년 멕시코 멕시코시티 외곽에서 리히터 규모 8의 강진이 일어났다. 지진파가 시내까지 전달됐는데, 대부분 20층 정도 높이의 건물이 무너졌다. 20층 건물의 고유진동수는 건물의 구조와 재료에 따라 다르지만, 대략 0.5헤르츠(Hz)로 본다. 멕시코 지진 때 지진파의 우세한 진동수도 0.5Hz였다. 1995년 리히터 규모 7.2의 일본 고베 지진 때는 건물의 5, 6층이 주로 피해를 보았다고 한다. 지진 모니터링 시스템을 설치하면, 지진의 주파수와 건물의 고유진동수를 측정할 수 있으므로, 해당 건물의 취약여부와 구조 안정성을 실시간으로 판단할 수 있다. 향후, 시스템의 경제성, FAB. 에서의 현장 적용성등을 검토하여 시스템 구현을 목표로 한다.

참고문헌

- [1] Monica D. Kohler, Paul M. Davis, and Erdal Safak "Earthquake and Ambient Vibration Monitoring of the Steel-Frame UCLA Factor Building", Earthquake Spectra: August 2005, Vol. 21, No. 3, pp. 715-736.
- [2] Reynolds, P. and Pavic, A. "Effects of False Floors on Vibration Serviceability of Building Floors. I: Modal Properties." J. Perform. Constr. Facil., 2003, 17(2), 75-86.

- [3] 장인성, 김기석, 조영삼, 박우선 "인천항에 대한 지진 모니터링시스템 구축", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2011.6, 2056-2059
- [4] 주승환, 서희석, 이승재, 김민수 "도시인프라 구조물 건전성 통합 모니터링 시스템", 한국시플레이션학회 논문지 제 19 권 제 2 호, 2010.6, 147-155