

SHM 시스템 시공 고려사항

Check Point for Construction SHM System



김 유 승*
Kim, Yu-Seung

1. 모니터링 시스템의 개요

최근 갈수록 대형화되고 복잡해지는 구조물을 시공 및 유지관리와 재해등에 대비한 방재시스템을 구성하기 위한 기반기술로써 SHM (Structural Health Monitoring) 기술이 제시되고 있고, 이에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. 이러한 SHM 기술은 현대 기술의 가장 큰 화두인 “융합”이라는 과제를 구현하는데 있어 하나의 모범사례로도 간주 될 수 있다. SHM 시스템을 구현하기 위해서는 구조역학적 관점에서의 엔지니어링 접근과 실구조물의 정보를 포함하는 데이터의 수집과 이러한 데이터를 연구자에게 신뢰성있게 전송해 주는 기술등 현재 발달된 모든 기술이 총망라되어야 구현 될 수 있는 기술이라고 할 수 있다. 사실 SHM이라는 용어 이전에 이미 계측 일반은 시공중 시공 정보의 수집이나 완공된 구조물의 사용성 평가, 안전진단과 같은 다양한 부분에서 적용되어 지고 있었다. 또한 이러한 계측

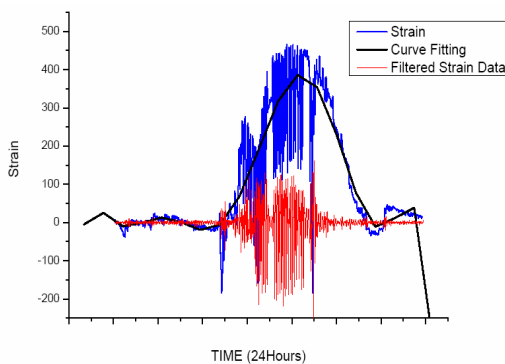
및 측량이나 다른 방식으로의 정보에 대한 접근을 통합하려는 움직임도 진행되고 있었으나, 실제 오늘날의 SHM이라고 불리는 시스템의 형태를 갖추게 된 데에는 통신 및 데이터 전송과 저장등에 기여한 IT 기술의 발달이 큰 역할을 했다고 볼 수 있다. 즉, IT 및 통신, 전기전자 기술이 발달함으로써, 계측분야에 있어서 매뉴얼한 방식의 1회성 계측이 모니터링이라는 관점에서 데이터의 장기적 거동을 분석 가능하게 하였고, 다양한 센서의 발달과 이런 광범위한 종류의 센서와 대용량의 센서데이터를 관리하는 프로세서가 보다 심층적이고 정밀한 구조의 분석을 가능하게 하였다. 하지만 아직까지 실현장에서 SHM 시스템을 구현하기 위하여 필요한 여러 고려 사항들이 있으며, 본 기사는 이러한 SHM 시스템을 대상 현장에 적용할 때 실제적으로 고려해야 할 부분들을 사례 중심으로 짚어 보고자 한다.

* KTMG(주) 대표이사

2. 모니터링 시스템 고려사항

2.1 온도의 영향

먼저 이러한 SHM 시스템을 구성하는데 있어 기존 계측시스템이나 자동화 계측, 측량등과의 차이점을 고려해야 하는 부분중 가장 중요한 부분은 모니터링은 장기 계측을 기반으로 한다는 것이다. 다음의 <그림 1>은 모니터링에 있어서 장기계측과 관련된 부분을 간과한 경우의 데이터에 관한 내용이다.

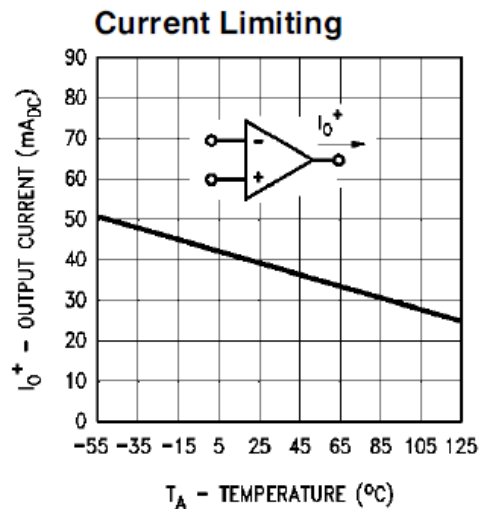


<그림 1> 변형률 데이터의 필터링

<그림 1>은 스트레인 게이지를 이용한 타워크레인 하중에 의한 장기 변형률을 계측하기 위한 시스템으로써 1일 데이터의 변동을 나타내고 있으며, 그래프의 Y축은 계측된 변형률 값을 보여주고 있다. 그래프에서 파란색 데이터 선은 실제 계측된 변형률 값이며 검은색 선은 전체 24시간에 대한 변화경향을 Curve fitting을 통해 보여 주고 있다. 물리적으로 타워크레인 양중시 재하되는 하중에 의한 변형률값을 계측해야 하지만 온도에 의한 경향값이 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 1일 기온 변화에 의한 온도로 인한 영향이 매우 낮은 주파수 성분으로 가정하고 High-pass filter를 이용하여 성분을 분리해 내면 변형률에서 하중에 의한 변동성분만을 골라낼 수 있다. 그러나 아직 이 부분은 기술적으로 매우 이슈가 될 수 있는 부분임에는 틀림없다. 기본적인 하드웨어와 센서구조에서는 (특히 스트레인게이지의 경우) 온도 보상에 관한 회로등이 추가되어 온도의

변화로 인한 열응력등을 보상할 수 있도록 되어 있다. 특히 대한민국과 같이 일년의 년교차와 일일 일교차가 큰 경우 이러한 온도에 의한 데이터의 Bias 및 회로의 Drift는 필연적으로 발생 할 수 밖에 없는 환경이다. 만약 하중에 의한 변형률만을 고려한다면 위의 데이터는 전혀 쓸모가 없는 데이터가 될 수도 있다. 하지만 구조물의 안정성에 관한 부분을 고려한다면 실제 구조물에 작용하는 열응력또한 고려되어야 하므로 실제 계측된 (열응력과 재하하중으로 인한 응력을 포함한) 데이터가 검토를 위해 필요하다.

센서 및 데이터로거 등의 장비들은 실제 온도에 매우 민감한 장비들이다. 위의 <그림 1>에서의 데이터 중 실제 과도하게 반응한 부분은 센서 및 데이터로거 회로의 온도에 따른 비선형성에 기여한 부분이 있다. 다음의 <그림 2>는 이러한 회로를 구성하는 칩들에 있어서의 온도 의존성을 보여준다.

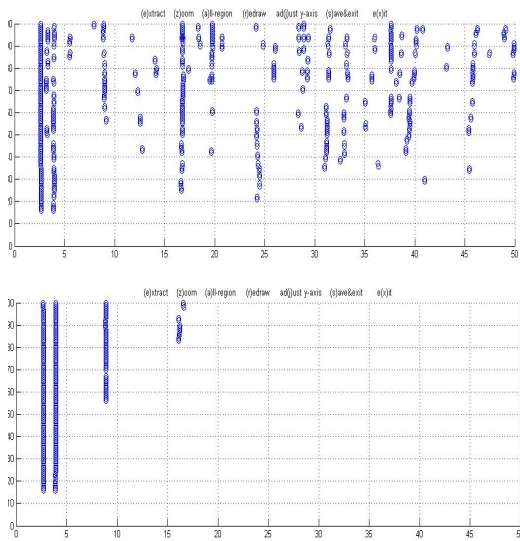


<그림 2> 아날로그 회로의 온도의존성

위의 <그림 2>는 신호처리에 있어 기본이 되는 증폭기 OP amp의 온도에 대비한 소자의 온도 의존성을 보여주는 그림이다.

이러한 소자들의 온도의존성을 극복하기 위해서는 시스템 구축 시 주변 온도의 영향을 받지 않도록 차폐를 시켜주는 것이 반드시 필요하다. 하지만 이러한 온도 차폐의 부분에는 2가지 문제가 발생하게

된다. 일단 각 계측 센서 및 데이터로거나 회로를 차폐하기 위한 비용이 매우 고가라는 부분이다. 이러한 부분을 고려하기 위해선 시공비가 매우 높아진다는 문제가 있다. 2번째 부분은 케이블이 길어질 경우 케이블 자체가 전도체로 온도에 매우 민감한 영향을 받는다는 것이다. 이러한 부분을 고려하여 모니터링 시스템을 설계하는 것은 매우 어려운 일이라 할 수 있다.



〈그림 3〉 케이블 영향 비교 (가속도데이터)

특히 케이블에 관한 경우는 매우 많은 경우 제기되는 문제로 케이블의 임피던스로 인하여 데이터가 왜곡되거나 영향을 받는 일이 빈번하다 보니 SHM 시스템을 구성하는 사람들에게 있어서는 특히나 매우 민감한 문제라 할 수 있다. 일반적으로 현장에서 케이블을 고려하는 경우는 케이블 길이에 따른 저항의 증가로 인한 전압강하만을 간주하나 실제로는 케이블의 임피던스 변화로 인하여 발생하는 노이즈와 데이터 왜곡 역시 중요한 문제이다. 위의 〈그림 3〉은 빔구조물의 모드를 구하기 위하여 케이블(500M)을 센서에 연결하여 사용한 경우와 케이블 없이 바로 연결한 경우이다. 이렇게 얻어진 가속도 데이터를 활용하여 SSI (Stochastic Subspace Identification) 방법을 이용하여 모드의 안정도 다이어그램

을 작성하여 데이터를 확인해 보면 확연하게 케이블의 영향이 데이터에 주는 영향을 확인 할 수 있다.

2.2 초기치의 문제

일반적인 데이터 로거의 경우 센서데이터를 처리함에 있어서 0 V의 기준점을 중심으로 Calibration을 진행하게 된다. 만약 모니터링시스템이 동작을 계속 진행하는 경우 이러한 Calibration이 따로 필요 없을 수도 있다.(그럼에도 Calibration은 주기적으로 진행해 주어야만 한다.) 그러나 고려하지 않은 장비의 다운이나 정전등으로 인하여 새로 시스템을 설정해야 할 경우 모니터링 시스템은 매우 취약한 약점을 갖게 된다. 일반적으로 대부분의 센서의 경우 구조물 내부에 매립되어 지는 경우가 대부분이다. 구조물에 부착되어 센서가 매립되어 있는 경우 데이터로거와 상관없이 센서의 Calibration은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 특히 변형률계의 경우 일단 부재에 부착된 상태에서는 Calibration 및 초기치와 전원공급을 재개한 이후의 데이터를 검증하기가 어려워 지게 된다. 다음의 〈그림 3〉은 초고층 빌딩의 Column의 변형율을 계측하기 위하여 센서를 매립 및 설치한 사진이다. 그림에서 보듯이 왼쪽은 철골에 직접 용접하여 부착을 한 경우이고, 오른쪽은 기둥에 콘크리트를 타설하고 외부에 변형률계를 부착한 경우이다. 오른쪽의 경우는 추후 센서의 유지관리 등을 위해 외부에 센서를 부착한 경우이다. 특히 콘크리트 부위에 부착한 센서의 경우는 특히 이런 초기치 문제와 콘크리트 재료의 균열등 까지도 고려한 Jig를 설계하여 부착하였다.



〈그림 4〉 변형률센서 부착 사례

이러한 초기치 문제를 해결하기 위한 많은 방법들이 연구되고 시도되고 있으나 아직은 표준화되어진 행된 사례는 보고 되지 않고 있다. 센서와 데이터로거등의 표준화에 관한 연구와는 별도로 이러한 시스템 설치를 위한 지그와 설치 방법, 유지관리 및 교정 등에 대한 표준화 연구가 필요한 부분이다. 현재는 신호처리등을 이용하거나 기타 회로를 구성하여 케이스별로 적용하고 있지만 이러한 데이터의 정량적 기준을 위해서는 보다 많은 연구와 적용사례 개발이 필요하다.

2.3 동기화 문제

계측시스템에 있어서 가장 중요한 부분의 하나는 입력에 대한 계측데이터의 응답 분석을 위한 시각동기화이다. 특히 구조물이 대형화되면서 센서들 사이의 거리가 멀어지고 필요한 데이터로거들의 수량이 많아지면서 데이터 전송시 발생하는 각 종의 지연요소들로 인하여 데이터의 시각동기화를 필요로 하게 되고 이를 극복하기 위한 많은 시도와 개발이 이어지고 있지만, 이 부분 역시 표준화된 절차나 제품이 적용되어 성공적인 사례로 판단되는 부분이 많지 않다.

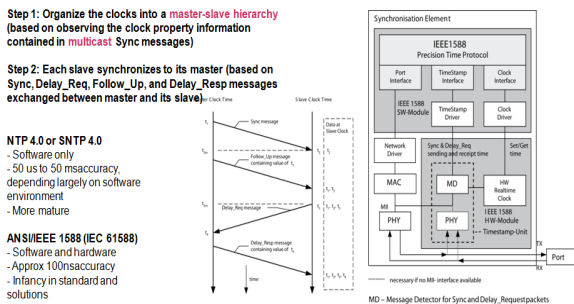
이러한 시각동기화를 위하여 많이 이용되어 지는 부분이 네트워크의 딜레이를 프로그램을 통해 보상해 주는 방법으로 시간지연요수를 파악하는 방법이다. 이를 위해서 IEEE 1588에서 제안되는 방법이 사용되어 지고 있다.

IEEE 1588에서 제안된 동기화 알고리즘이다. 노드들 간에 시각을 보정하기 위해 마스터 노드와 슬레이브 노드는 클럭 오프셋과 전송지연 보정을 수행한다. IEEE 1588에서 마스터 노드는 sync와 follow_up 메시지를 이용하여 오프셋 보정을 시작한다. 마스터 노드가 sync 메시지를 전송하면, 슬레이브 노드는 자신의 지역 클럭(local clock)을 사용하여 sync 메시지의 도착 시각을 기록한다. 마스터 노드는 sync 메시지가 전송된 시각을 연속된 follow_up 메시지에 포함하여 송신한다. 슬레이브노드는 측정한 메시지 도착 시각과 follow_up 메시지 내의 타임스탬프 값을 비교한다. 두 타임 스탬프값의 차이를 계산함으로써 오프셋을 산출해 낼 수 있다. 하지만 계산된 오프셋은 전송 지연을 포함하고 있으므로 전송 지연을 계산해 내는 두 번째 과정이 필요하다. 전송 지연 계산을 위해 IEEE 1588은 delay_req와 delay_resp 메시지를 사용한다. 슬레이브 노드는 전송 지연 계산을 시작함을 알리는 delay_req 메시지를 송신함과 동시에 송신 시각을타임 스탬프 한다. delay_req 메시지를 수신한 마스터 노드는 delay_req가 도착한 시각을 타임 스탬프하여 이를 delay_resp 메시지에 포함하여 응답한다. 슬레이브 노드는 양방향(round trip time) 지연을 평균하여 전송 지연을 계산한 후 슬레이브의 지역 클럭을 조절한다.

3. 고려사항에 대한 제언

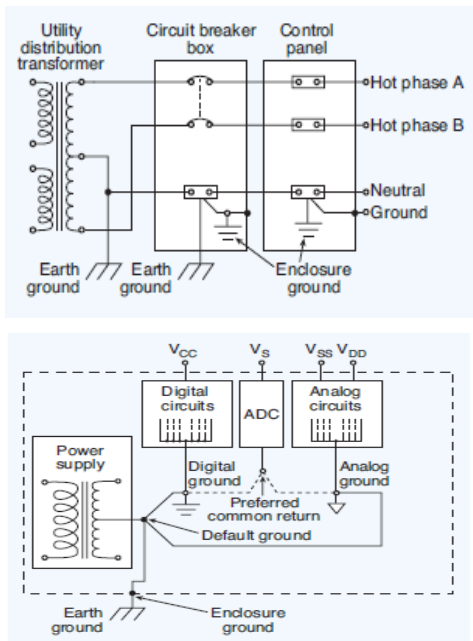
3.1 온도의 영향

온도의 영향을 보상하기 위해서 더미게이지(dummy gauge)를 사용하거나 온도 보상회로를 사용하는 방법, 또한 신호처리 기법등을 이용하는 방법이 있지만 가장 좋은 방법은 환경적으로 차폐를 만들어 주는 방법이다. 항온항습 함체를 사용하여 일정한 온습도 계측환경을 만들어 주게 되면 환경적 요인에 의한 부분을 제외한 시스템을 구성할 수 있다. 또한 케이블에서의 온도 영향을 억제하기 위해서는 다음과 같은 방법을 사용할 수 있다.



〈그림 5〉 시각동기화 알고리즘 구성

위의 〈그림 4〉는 이러한 시각동기화 방법을 위한



〈그림 6〉 케이블 온도영향 억제를 위한 구성

위의 〈그림 6〉은 계측장비등의 Frame과 케이블의 접지를 고려하는 방법으로 가상으로 계측함체의 접지를 잡아 주는 방법이다. 이러한 접지방식은 케이블의 노이즈만을 억제하는 것이 아니라 케이블을 통해 열전도를 유발시켜 케이블의 온도를 평형상태로 유지할 수 있도록 해준다.

3.2 초기치의 문제

사실 초기치 문제의 경우 특수한 Jig를 설계하거나 센서를 탈부착이 가능하도록 하는 이외에는 달리 방법을 찾기가 용이하지 않다. 이러한 하드웨어적인 문제만이 아니라 계측데이터의 관리를 통해서도 어느 정도는 초기치를 보상해 줄 수 있으나, 이러한 방법들도 한계를 갖게 된다.

변형률을 측정하는 경우는 이러한 초기치 의 값을 기준으로 관리 기준으로 설정하기 때문에 이 부분은 매우 중요한 문제가 된다. 이를 보완하기 위한 Auto Calibration 회로나 각종 교정장치에 대한 개발이 진행중이지만 실제로 이 부분에 대해서는 초기치를 관리할 수 있는 센서를 사용하는 것이 중요하다. 여기서 초기치를 관리할 수 있는 센서로는 FBG 광섬

유격자 센서나 진동현식 게이지를 들 수 있는데, 이 들 센서는 변형률의 절대치를 계측하기 때문에 초기치의 영향을 보상해 줄 수 있다.

3.3 동기화 문제

현재까지 동기화 문제를 해결하기 위한 방법은 크게 GPS 의 clock을 이용하는 방법과 IEEE 1588 알 고리즘을 사용하는 방법이 가장 효율적인 대안이라고 할 수 있다. 또한 개발되어지는 장비들도 GPS 신호를 이용한 계측장비들이 적용되어지는 추세이다. 하지만 GPS 신호를 이용한 장비 역시도 100% 원하는 동기화 신호를 만들어 내기는 어려우며, 이를 극복하기 위해서는 체계적인 네트워크 설계와 IEEE 1588을 적절히 적용하는 보완책을 준비하여야만 한다.

4. 결론

이러한 고려 사항 이외에도 적용되는 대상과 시스템 특성에 따라 많은 부분 고려되어 져야 할 부분들이 모니터링 시스템을 시공하는데 요구되고 있다. 그러나 아직까지는 이러한 부분에 대한 전반적인 연구가 체계적으로 진행되기 어려운 부분이 있다. 이러한 SHM을 위한 모니터링 시스템의 경우 구조역학적인 부분 만이 아니라 전기, 전자와 기계, 장비, 네트워크와 프로그램 등 많은 부분의 체계적이고 이러한 기술을 융합하는 부분에서 발생하는 문제에 대한 해법을 요구하게 된다. 지금까지 많은 부분 이러한 환경적 영향이나 현장에서 발생하는 문제에 대한 고려는 임기응변이나 일회성에 한하는 경우가 많았다. 따라서 우선적인 부분은 이러한 부분에 대한 연구가 진행되어 져야 할 것이다.

위에서 언급한 3가지 문제에 있어서 가장 중요한 부분은 측정에 대한 개념의 변화라고 할 수 있다. 많은 엔지니어와 연구자들이 요구하는 것은 측정대상의 정확한 값을 요구한다. 그러나 SHM 시스템등 모니터링에서 요구되는 부분은 장시간에 걸친 거동의

변화성이라고 할 수 있다. 측정이라고 하는 행위는 1 회성에 기반한 행위라고 할 수 있지만 모니터링은 이러한 측정을 지속적으로 반복하여 그 데이터의 경향이 분석에 있어 주요 인자가 되게 된다.

참고문헌

1. Doyle, J . C . B . A .Francis, and A.R.Tannenbaum, feedback Control Theory, Maxwell macmillan, New York, 1992.
2. M.S. Chen, and M. Tomizuka, "Robust output feedback control for uncertain Linear systems,"
3. M. Coless, and G. Leitmann, "Continuous state feedback guarateeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems, "IEEE Trans, Automat. Contr., Vol. AC-26, pp.1139~1133,1981.
4. C. A. Desoer, and M.Vidyasagar, Feedback Systems : Input Properties,Academic Press, Newyork,1975
5. A. Isidori, Nonlinear Control Systems : An Introduction, springer Verlag, New york,1985
6. G. Leitmann, "On the efficiency of nonlinear control in uncertain linear systems," J. of Dyn. Sys., mea. and cont., Vol. 103, No. 2, pp.95~102,1981
7. T. Kailath, Linear ystem, Pretice-Hall, N. J. Englewood Cliffs, 1980