

가속도 데이터의 자기회귀모델을 이용한 구조물의 건전성 평가

Structural Health Monitoring using Dynamic Responses with Autoregressive Model

강주성* · 박현우** · 이해성***

Kang, Joo Sung · Park, Hyun Woo · Lee, Hae Sung

1. 서 론

최근 많은 연구분야에서 구조물의 건전성 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 구조물의 건전성 평가에 있어서 가장 일반적인 목적은 주어진 구조물의 하나 혹은 여러개의 시스템 변수에 변화가 생겼을 때 가능한한 빨리 그 변화를 파악하여 구조물의 건전성 여부를 판단하는 것이다. 정적 또는 동적 측정 데이터를 이용하여 구조물의 건전성을 평가하는 많은 기법들이 제안되어 왔으나, 구조물의 건전성 평가에서 가장 어려운점은 계측된 자료에는 구조물의 손상정보 뿐만 아니라 환경적인 요인에 의한 교란까지도 포함되기 때문에 계측된 가속도 자료로부터 구조물의 손상 여부를 판단하는 것이 쉽지 않다는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 측정 가속도 자료와 시간창기법을 이용하는 새로운 구조물의 건전성 평가기법을 제안한다. 계측된 가속도 자료로부터 시스템의 변화를 파악하기 위해 자기 회귀모델을 이용한다. 환경적인 요인들에 의한 교란은 대부분 긴시간동안 점진적으로 변화하므로 이런 환경적인 요인들을 제거하기 위해서 시간창기법을 도입한다. 시간창기법에서는 시간창이라고 불리는 유한한 시간간격내의 계측 자료를 이용하여 잔차오차를 계산하고 점진적으로 이동해 나가면서 반복적으로 잔차오차를 구해낸다. 시간창은 전체 계측시간이나 환경적인 요인에 의한 교란 시간보다 매우 짧으므로 시간창 내에서는 환경적인 요인에 의한 변화가 없다고 가정할 수 있다. 계산된 잔차오차로부터 구조물의 건전성을 평가하는데 신뢰성을 높이기 위해 극치 분포(Extreme Value Distribution)를 이용한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 2 경간 트러스 수치모사 예제를 통해 검증한다.

2. 자기회귀모델

장기적으로 취득되는 계측 가속도 자료를 효율적으로 분석하여 구조물의 건전성 평가에 적용하기 위해 자기회귀 (Autoregression, AR)모델^[1]을 이용한다. 자기회귀 모델은 시계열 자료의 통계적인 분석을 위해 주로 이용되는 방법으로서, 어떤 시간 단계의 자료가 그 이전 시간 단계의 자료들의 선형 조합과 임의의 오차의 합에 의해서 표현되는 모델이다. 일정한 시간간격 $t, t-1, t-2, \dots$ 에 해당하는 가속도 자료를 각각

* 정희원 · 서울대학교 지진공학연구센터 연구원 · 공학석사 · E-mail:jskang94@snu.ac.kr – 발표자

** 정희원 · 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원 · 공학박사 · E-mail:hwpark91@snu.ac.kr

*** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 · 공학박사 · E-mail:chslee@plaza.snu.ac.kr

$x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots$ 라고 하면 일반적인 p 차 자기회귀 모델은 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{x}_t = \phi_1 \tilde{x}_{t-1} + \phi_2 \tilde{x}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{x}_{t-p} + e_t \quad (1)$$

여기서, \tilde{x}_t, ϕ, e_t 는 각각, x_t 와 평균 μ 와의 편차, 즉, $\tilde{x}_t = x_t - \mu$, 자기회귀 계수 그리고 시간 단계 t 에서 시스템에 가해지는 임의오차를 나타낸다.

시스템이 변화하지 않고 일정한 경우에는 한번 구해진 자기회귀 모델에 의한 추정치와 실제 계측 자료간의 차이가 작다. 그러나, 시스템에 변화가 발생하게 되면 기존 시스템의 계측 자료들로부터 구해진 자기회귀 모델에 의해 계산된 값과 시스템이 변화한 후의 계측 자료간에 큰 차이가 발생할 것이므로, 이를 이용해서 구조물의 건전성 평가에 자기회귀 모델을 적용할 수 있다. 즉, 계측 자료들로부터 자기회귀 모델을 구성하여 시스템의 응답을 추정하고, 추정값과 계측 자료간의 잔차오차를 지속적으로 관찰하여 실시간으로 구조물의 건전성 여부를 판단할 수 있다.

3. 시간창 기법

구조물의 건전성 평가에서 가장 어려운점은 환경인자에 의한 계측 자료의 교란이다. 낮과밤, 계절, 온도와 습도차이 등 수많은 환경요인에 의해 계측자료는 교란을 받게되고 구조물에 아무런 변화가 없을지라도 이런 환경요인들에 의해 계측 가속도 자료는 많은 차이를 보이게 된다. 기존에 제안된 많은 방법들이 이런 환경요인을 해결하는데 어려움을 겪었고 실내실험에서는 잘 맞는다 할지라도 실제 교란에는 적용이 쉽지 않은 실정이었다. 이런 환경적인 요인을 제거하기 위하여 시간창기법(Time Windowing Technique)을 도입한다. 환경적인 요인들은 대부분 긴 시간간격을 가지고 점진적으로 변화한다. 시간창 기법에서는 시간창이라고 불리는 유한한 시간간격 내의 계측자료들만 이용하여 잔차오차를 계산한다. 이 시간창 내에서는 전체적인 계측시간이나 환경적인 요인에 의해 가속도 응답이 바뀔만한 시간에 비해 매우 짧은 시간간격을 가지고 있으므로 이 시간창내에서는 환경적인 요인에 의한 변화가 없다고 생각할 수 있다.

시간창 기법을 이용하면, 그림 1 과 같이 시간창내의 계측 자료를 이용하여, 순차적으로 예측을 해 나가게 된다. 그런데, 어떤 효과에 의해서 시간 t_D 에 시스템에 변화가 생겼다고 가정하면, t_D 이전 시간의 시간창에서는 시스템에 변화가 없으니 자기회귀 모델에 의한 추정값과 계측 자료간의 잔차가 작게 나타난다. 시간

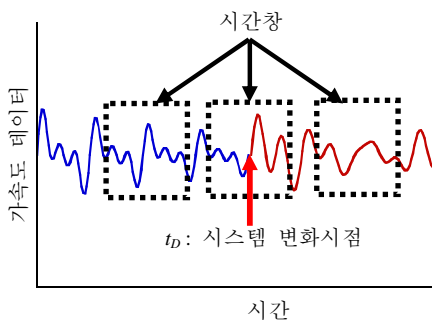


그림 1. 시간창 기법

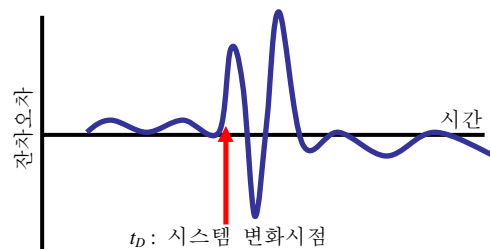


그림 2. 잔차오차

이 점점 지나가면서 손상이 발생한 시점의 계측 자료들이 자기회귀 모델에서 사용하는 시간창내에 들어오게 되면 변화된 시스템의 정보가 들어오기 시작하므로 기존의 시스템의 정보에 의해서 구해진 자기회귀 모델에서 구한 값과 변화된 시스템에서 계측된 자료간의 잔차오차가 커지게 된다. 시간이 계속 진행되어 시간창의 시작점이 시스템의 변화가 발생한 시점을 지나 더욱 진행하게 되면 시간창 내에 계측 자료들은 모두 손상을 받은 구조물의 정보로 채워지게 되고, 그 자료들로부터 새로이 구한 자기회귀 모델을 이용해 구한 값과 계측 자료간의 잔차는 다시 줄어들게 된다.

4. 건전성 평가

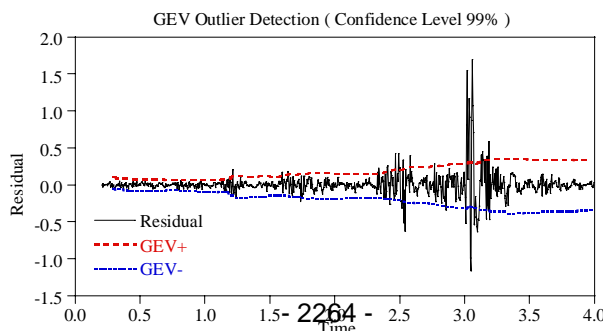
매 시간창마다 예측된 값과 계측된 값사이의 잔차오차가 구해지면 이를 이용해 시스템의 건전성 여부를 판단해야 한다. 단순히 잔차오차의 절대값이 크다는 것만으로 구조물의 건전성 여부를 판단하기에는 무리가 있다. 잔차오차들의 분포를 파악하고 그 분포로부터 원하는 신뢰구간에서 벗어나는 잔차오차들을 골라내야 보다 신뢰성있는 평가를 내릴 수 있다. 실제 손상에 해당하는 잔차오차는 대부분 구해진 잔차오차들의 분포 중 양측 꼬리쪽에 위치하게 된다. 양측 꼬리부분의 분포를 잘 추정하기 위해 구해진 잔차오차들의 분포를 극치분포(Extreme Value Distribution)^[2]를 통해 추정한다. 일반적으로 극치분포는 Frechet, Weibull, Gumbel 세가지 분포중 하나를 따른다고 알려져 있으며 이를 하나로 묶은 식 (2)와 같은 GEV(Generalized Extreme Value Distribution)^[3]를 통해 잔차오차들의 극치분포를 구한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{- maxima : } \bar{G}(x; \lambda, \delta, c) = \exp\left\{-\left[1+c\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right]^{-1/c}\right\} \quad \left(1+c\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right) \geq 0, \delta > 0\right) \\
 & \text{- minima : } \underline{G}(x; \lambda, \delta, c) = 1 - \exp\left\{-\left[1+c\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)\right]^{-1/c}\right\} \quad \left(1+c\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right) \geq 0, \delta > 0\right)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

5. 예 제

제안된 기법의 타당성을 검증해 보기 위하여 그림 3에 나타나있는 2 경간 트러스에 대하여 수치모사 예제를 수행해 보았다. 구조물의 물성치는 일반적인 강재의 물성치(탄성계수 = 210 Gpa, 단위질량 = 7850 kg/m³)를 사용하였다. 각각의 부재군의 단면적은 상현재, 하현재, 수직재, 사재가 각각 250, 300, 200, 220 cm²이다. 지진시의 상태를 고려하기 위해 고베지진시 기록된 지반가속도가 지점에서 작용하고 있는 상황을 모사하였다. 감쇠비는 모달 댐핑 3%~30%로 연속적으로 분포한다고 가정하였다. 200Hz의 주파수로 총 4초간 800개의 계측 자료를 생성하였다. 시스템의 변화는 3초에 어떤 급작스런 변화로 인해 부재 7번과 16번의 강성이 각각 40%, 50%감소한 것으로 가속도 자료를 시뮬레이션 하였다. 계측 자료는 왼쪽 경간 가운데 하현재에서 측정한 연직방향 가속도 자료를 사용하였다. 측정오차를 고려해 주기 위해 가속도 자료에 최대 5% 임의의 비례오차를 가해 주었다.

타나있다. 3 초 시점에
 게 발생하는 것은 측정
 그림 4에 점선으로 나타



! 잔차오차가 그림 4에 나
 의 시간대에 잔차오차가 크
 상 여부를 판단해본 결과가
 로 확연하게 손상으로 판단

그림 4. 건전성 평가

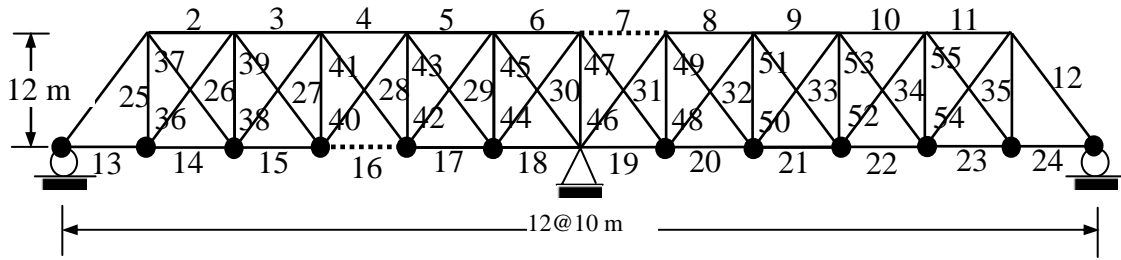


그림 3.2 경간 연속 트러스

된다. 그 외에도 몇 군데에서 손상으로 잘못 판단되고 있는 것을 확인할 수 있으나, 이 부분들은 지반가속도가 큰 부분으로서 하중의 갑작스런 변화가 자기회귀 모델에 영향을 준 것으로 판단된다.

6. 결 론

기존에 가장 큰 문제점이었던 환경적인 요인에 의한 계측 자료의 교란을 고려하지 않아도 되는 새로운 구조물의 건전성 평가기법을 제안하였다. 자기회귀 모델과 시간창 기법을 이용하여 잔차오차를 구해내고 이를 GEV 를 통해 잔차오차들의 분포를 찾아내는 보다 신뢰성있는 건전성 평가기법을 개발하였다. 제안된 방법을 2 경간 트러스 수치모사 예제를 통해 검증해 보았으며, 손상시점에서 잔차오차의 큰 증가를 확인할 수 있었다. 자기회귀 모델은 대상 구조물의 변화 뿐만 아니라 하중의 변화에 의해서도 크게 변화하는 것을 확인하였으며, 하중에 의한 영향을 구조물의 변화에 의한 영향에서 분리해내는 과정이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins and Gregory C. Reinsel, 1994, *Time Series Analysis forecasting and control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632
2. Enrique Castillo, 1988, *Extreme Value Theory in Engineering*, ACADEMIC PRESS, 1250 Sixth Avenue, San Diego, CA 92101
3. Hyun Woo Park and Hoon Sohn, 2005, "Parameter Estimation of the Generalized Extreme Value Distribution for Structural Health Monitoring", *Submitted to Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*.