

구조물의 안전성 모니터링을 위한 통계/확률기반 적응형 임계치 설정 알고리즘 개발

김태헌^{1*}, 박기태²

Development of Statistical/Probabilistic-Based Adaptive Thresholding Algorithm for Monitoring the Safety of the Structure

Tae-Heon Kim^{1*}, Ki-Tae Park²

Abstract: Recently, buildings tend to be large size, complex shape and functional. As the size of buildings is becoming massive, the need for structural health monitoring(SHM) technique is ever-increasing. Various SHM techniques have been studied for buildings which have different dynamic characteristics and are influenced by various external loads. Generally, the visual inspection and non-destructive test for an accessible point of structures are performed by experts. But nowadays, the system is required which is online measurement and detect risk elements automatically without blind spots on structures. In this study, in order to consider the response of non-linear structures, proposed a signal feature extraction and the adaptive threshold setting algorithm utilized to determine the abnormal behavior by using statistical methods such as control chart, root mean square deviation, generalized extremely distribution. And the performance of that was validated by using the acceleration response of structures during earthquakes measuring system of forced vibration tests and actual operation.

Keywords: Structural health monitoring, Abnormal behavior, Vibration response, Adaptive threshold, Long-term monitoring

1. 서 론

일반적으로 시설물은 그 위치와 용도 및 목적 하에 다양한 모양과 크기로 건설되며, 인간이 생활하는 공간이므로 보다 안락한 생활환경과 편의를 제공하는 각종 설비들이 설치된다. 최근의 건축물은 복잡한 기능과 형태를 보이고 있으며(Kim et al., 2014), 크기가 거대해짐에 따라 초장대 교량, 초고층 빌딩과 같은 대형 사회기반시설물의 손상은 곧 막대한 경제적 피해 및 심각한 인명 피해를 유발하므로(Jo et al., 2013), 최적의 성능으로 구동될 수 있도록 정기적인 검진이 요구되고, 무결점 거동 평가의 운용은 중요한 필수 요소 중 하나로 구조물 건전성 감시(Structural Health Monitoring)기술의 수요가 증가하고 있다(Sohn et al., 2014). 따라서 주요 사회기반시설물에 대한 주기적인 안전점검을 수행하고 있으며, 주로 전문가에 의해 접근 가능한 지점에 대한 육안 검사 및 비파괴 검사를 수행하고 있지만 점검에 필요한 인력과 자원의 부족 및

접근이 불가능한 시설물에 대한 점검의 어려움 등으로 인하여 최근에는 온라인 계측시스템의 구비와 함께 자동으로 위험요소를 검출할 수 있는 시스템이 요구되고 있다(Kim et al., 2015). 건축물은 복잡한 재료로 구성되어 있고, 다양한 외력의 영향을 받기 때문에 건전성을 평가하는 다양한 방법들이 연구되고 있다.

구조물의 전역적(Global) 건전성 평가 방법으로 많은 연구에서 진동 응답을 이용하여 진폭 변화나 위상 변화, 공진 주파수 변화, 감쇠비 변화 등의 신호 변화 특성을 추출하고 평가한다. 이때, 수학적 모델의 사용 여부에 따라 Model Based Method와 Non-model Based Method로 분류할 수 있다(Doebling et al., 1998). Model Based Method는 손상 전 상태(Intact State)의 수학적 모델을 기준으로 현재 상태의 손상 여부를 판단하는 방법으로서 정교한 수학적 모델을 구성하기 위한 시스템 식별(System Identification)기법이 필요하다. Non-model Based Method는 손상 전 상태의 구조물 측정 신호를 기준으로 현재 상태의 손상 여부를 판단하므로 수학적 모델이 필요 없다. Model Based Method 기법은 손상의 위치와 손상 정도가 검출이 가능하지만 정확한 모델 업데이트가 수반되어야 하는 단점이 있다. 반면 Non-model Based Method는 손상의 정도를 파악하는데 어렵지만 손상의 유무와 위치 검출은 가능하다(Lee et al., 2008). 즉, 별도의 구조해석 없이 실제 구조물의 계측정

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구원, 교신저자

²정회원, 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구위원

*Corresponding author: taeheon@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

보를 통계/확률기법에 적용하여 손상 유무를 판단할 수 있다. 하지만 진동기반의 손상탐지 기법은 선형 모델을 가정하므로 균열 등의 비선형성 요소를 고려할 수 없다는 점이 있다(Huh and Kim, 2010). 본 연구에서는 Non-model Based Method형 알고리즘에 비선형성을 고려하기 위해 구조물의 응답을 이용하여 통계/확률기반 적응형 임계치 설정 알고리즘의 개발을 수행하였으며, 강제진동 실험과 실제측 데이터를 이용하여 개발된 알고리즘의 검증을 수행하였다.

2. 통계/확률기반 적응형 임계치 결정 알고리즘 제안

현재 특수교 관리시스템에 따르면 센서를 통해 측정한 값에 대하여 관리기준치를 적용하여 주의 혹은 경고로 구분하고 있으나 과거 공용환경하에서의 기준치를 준용하고 있어 구조별 특성에 적합한 합리적인 관리기준치의 재설정 및 개선이 필요한 상태이다(Lee et al., 2010). 따라서 구조별 특성에 따라 비선형적인 관리기준치를 대체하기 위해 적응형 임계치 결정 알고리즘을 제안하였다.

Non-model Based Method에서 사용되는 구조 응답의 형태인 가속도 진동응답을 이용하였으며 통계/확률기반의 신호 특성 추출 과정을 거쳐 지수화된 특성을 적응형 임계치 설정 기법에 적용하고 구조 상태를 파악하는 단계로 전체 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

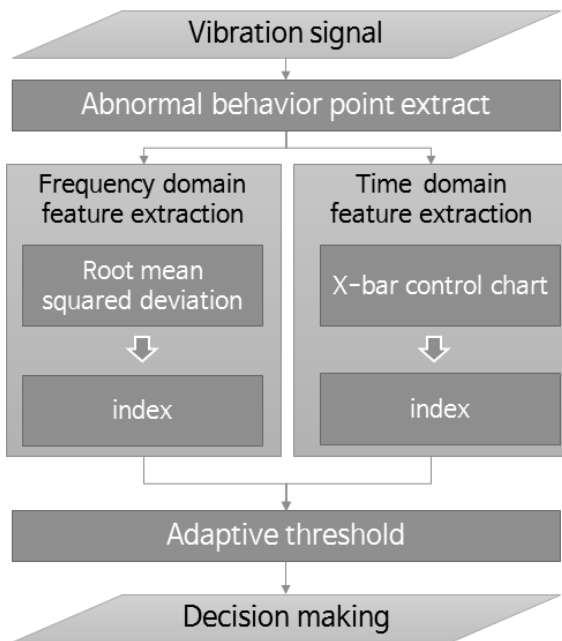


Fig. 1 The proposed algorithm

2.1 통계/확률기반의 신호 특성 추출

시간 영역의 특성 추출은 X-bar control chart 기법을 이용하였다. Control chart 기법이란 데이터의 분포에 가장 적합한 확률 분포를 선정하여, 기댓값, 중앙값, 분산 등의 확률 모수를 이용하여 상한치(Upper Control Limit, UCL) 및 하한치(Lower Control Limit, LCL)를 정하는 기법이다. 이 중 X-bar control chart는 Fig. 2와 같이 데이터를 정규 분포에 fitting하여 평균(μ) 표준편차(σ)를 추정하고, 이 값을 이용하여 UCL과 LCL를 설정할 수 있어 이를 벗어나는 아웃라이어(outlier)를 지수화하였다.

주파수 영역의 특징 추출을 위해 RMSD(Root Mean Squared Deviation)기법을 이용하였다. RMSD는 식(1)과 같이 기본적으로 정상 상태에서의 참조 신호와 실험 상태에서 측정한 데이터 간의 차이를 참조 신호로써 정규화하기 위한 프로세스이다. 여기서 Z_1 은 비교의 기준이 되는 신호(baseline)이며, Z_2 는 비교가 될 실시간 측정되는 신호이다. 따라서 구조 상태에 따라 공진주파수 이동량 및 진폭 변화, 형상 변화 등의 전반적 신호 변화 차이를 지수화하였다.

$$RMSD(\%) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,2})]^2}{[Re(Z_{i,1})]^2}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 확률 분포 해석을 통한 임계치 설정

손상 상태의 신호 특성은 일반적으로 정상 상태보다 상당한 수준으로 크게 산출되므로 확률 분포의 가장자리에 해당하고, 이 부분의 분포를 추정하기 위해 제안된 일반 극치 분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV dist.)는 구조물의 손상 탐지 분야에 매우 적합한 분포라고 말할 수 있다. 일반 극치 분포란 정규 분포(normal distribution)에서 최소 또는 최대 구간에 밀집되어 있는 데이터 분포를 묘사하는 확률 분포로써 식(2)와 같이 정의된다.

$$GEV: \bar{\phi}(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (2)$$

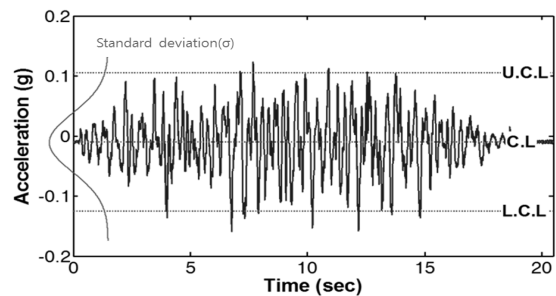


Fig. 2 Concept of X-bar control chart technique

일반 극치 분포는 타입 I, II, III의 3가지 형태로 표현되고 주어진 확률변수의 특성에 따라 또 최댓값에 대한 분포인가 최솟값에 대한 분포인가에 따라 극치 분포가 달라지며 일반적으로 어떤 극치 분포를 따르는지는 미리 정해져 있지 않다. 일반 극치 분포의 모수는 평균(μ), 표준 편차(σ), 형상 모수(ξ)의 3가지이다. 이 모수 중 형상 모수가 분포의 거동을 지배하는데, Fig. 3과 같이 $\xi \rightarrow 0$ 일 경우를 Gumbel 분포(타입 I), $\xi > 0$ 인 경우는 Fréchet 분포(타입 II), $\xi < 0$ 인 경우는 Weibull 분포(타입 III)라 한다(Fisher et al., 1928).

먼저 Gumbel 분포는 식(3)과 같이 표현된다.

$$F: (x; \mu, \sigma) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \quad (3)$$

$-\infty < x < \infty$ and $\sigma > 0$

다음으로 Fréchet 분포는 식(4)와 같이 표현된다.

$$F: (x; \mu, \sigma, \alpha) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{x-\mu}\right)^\alpha\right] & \text{if } x \geq \mu \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

마지막으로 Weibull 분포는 식(5)와 같이 표현된다.

$$F: (x; \mu, \sigma, \alpha) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq \mu \\ \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^\alpha\right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

구해진 손상지표들의 분포가 세 가지 극치 분포 중 어떤 분포로 가장 잘 추정할 수 있는지 알기 위해 세 가지 극치 분포에

대해서 각각 추정하여 손상 지표의 분포를 찾아야만 한다.

신호 특성의 분포를 추정하는 극치 분포를 찾아내기 위해 신호 특성을 위 일반 극치 분포에 fitting 시켜 확률분포 모수를 산출하여 극치 분포 타입을 결정하고 이상신호 임계치를 계산하였다. 이때 계측시 발생하는 잡음과 신호 특성 추출에서 발생할 수 있는 오류 등을 고려하기 위해 신호 특성의 신뢰 구간을 결정해야하는 데 일반적으로 95%를 사용하며, 필요에 따라 변경이 가능하다.

3. 강제진동 실험 기반 신호 특성 추출 알고리즘 검증

3.1 실험 개요

강제 진동 실험의 대상 구조체는 3층 빌딩 모형을 사용하였으며, 각 층의 4면에 X자 형태로 1 mm 두께의 강제 브레이싱을 체결하였다.

실험 시나리오는 Table 1과 같이 총 9개의 케이스로 수행하였으며, 각 케이스당 5회 데이터를 계측하였다. 케이스 1은 모든 브레이싱이 체결되어있는 상태로써 이 상태를 정상 상태로 가정하였다. 손상은 브레이싱을 제거하여 모사하였다. 케이스 2~4까지는 1층부터 3층까지 각 한 층의 브레이싱을 제거한 상태이며, 케이스 5~7은 두 층의 브레이싱을, 케이스 8은 전 층의 브레이싱을 제거한 상태이다. 마지막 케이스는 다시 모든 브레이싱을 체결한 상태로써, 최초 케이스 1과 동일한 상태이다. 이 케이스는 안전성 평가 알고리즘의 재현성을 검증하기 위한 케이스이다.

설치한 센서는 각 층 별로 각각 다른 column에 2개씩 부착하여 총 6개의 가속도계(sensor 1, 2는 1층, 3, 4는 2층, 5, 6은 3층)를 부착하였다.

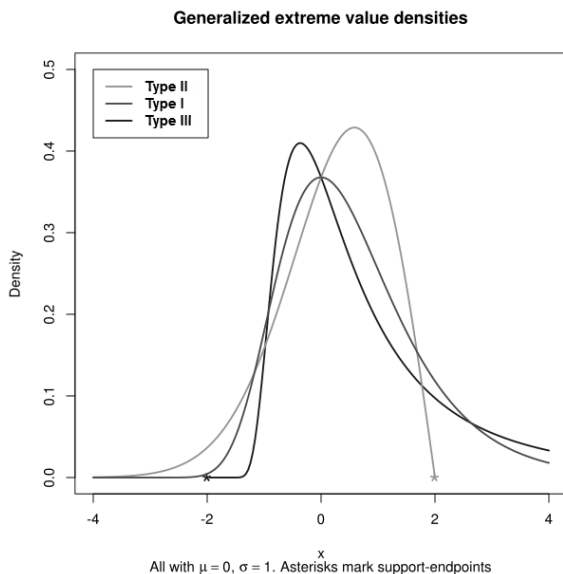


Fig. 3 Generalized extreme value distribution

Table 1 Experimental Damage Cases

Case #	Condition
Case 1	Normal-all bracing fastened
Case 2	Bracing on 1 st floor remove
Case 3	Bracing on 2 nd floor remove
Case 4	Bracing on 3 rd floor remove
Case 5	Bracing on 1 st and 2 nd floor remove
Case 6	Bracing on 1 st and 3 rd floor remove
Case 7	Bracing on 2 nd and 3 rd floor remove
Case 8	Damaged-all bracing removed
Case 9	Back to normal-all bracing fastened

3.2 시간영역에서의 신호 특성 추출

X-bar control chart로부터 검출한 이상치의 개수를 Fig. 4와 같이 지수로 나타내었다. 정상 상태를 임계치로 설정하여 비교하였을때 손상 케이스 별로 이상치의 개수가 증가하였음을 알 수 있다. 이 때 특이한 패턴이 관찰되는데, 층 별 이상치 개수 변화 패턴이 변화됨을 알 수 있다.

1층 데이터 계측 시 1층의 브레이싱을 제거한 경우 이상치의 개수가 가장 크게 도출되었으며, 인접한 2층 브레이싱 제거 시 또한 이상치가 증가하였다. 이는 2층 브레이싱의 제거가 1층 응답에 영향을 미친 결과이다. 2층 데이터 계측 시는 이상치 개수의 증가량이 1층 계측 데이터에 비해 컸는데, 이는 1층 브레이싱 제거에 대한 응답 증가량이 누적되어 2층에 영향을 미친 것으로 사료된다. 마지막으로 3층 브레이싱 제거의 경우도 1, 2층의 브레이싱 제거에 대한 영향이 누적되어 3층 응답에 영향을 미친 것으로 생각된다.

이러한 패턴을 이용함으로써 추후 센서 부착 위치에 따른 손상 위치 판단이 가능할 것으로 사료된다. 마지막으로 마지막 케이스인 모든 브레이싱 재제결 시에서는 이상치의 개수가 첫 케이스와 크게 차이가 없는 것으로 관찰되어 알고리즘의 재현성이 확보되었다.

3.3 주파수영역에서의 신호 특성 추출

RMSD를 이용하여 공진 주파수의 차이를 지수화하여 Fig. 5에 나타내었다. 단일 손상(case 2, 3, 4)에서는 시간 영역의 지수 변화와 동일한 패턴의 형태를 갖는 것으로 확인하였으며, 상층부 손상이 2층 및 3층 손상에 대하여 지수가 상승하는 계단 폭이 시간 영역과 비교할 경우 큰 폭으로 변화하였다. 따라서 시간 영역과 동일하게 하층부에서의 손상 영향 전이가 하층부에서 상층부로 발생함을 확인하였다.

복합 손상(case 5, 6, 7, 8)의 경우 역시 단일 손상의 경우와 동일하게 주파수 영역에 대한 지수 변화를 확인하였으며, 동일한 센서 노드(부재)에서의 지수 분포 변화가 일정하여 시간 영역 보다 지수 패턴 변화를 명확하게 확인할 수 있었다. 또한 복합 손상 발생 시 손상 영향이 중첩되는 경향을 확인하였다. 1층-2층 복합 손상 발생 시 1층의 손상 영향이 2층으로 전이되고 2층의 손상 영향이 중첩되어 복합 손상에 따른 2층의 지수가 단일 손상에 따른 2층 지수 보다 더 큰 값의 분포를 갖는 것으로 확인하였다.

단일 손상의 경우 최하층부의 제외하고 손상 발생 지점에서 지수가 한 계단 상승하는 지수 분포 패턴을 보이여 최하층부인 1층의 지수의 경우 정상상태와 동일한 분포 형태이나 전층에서 정상상태 이상의 지수 분포를 갖는 것을 확인하였다.

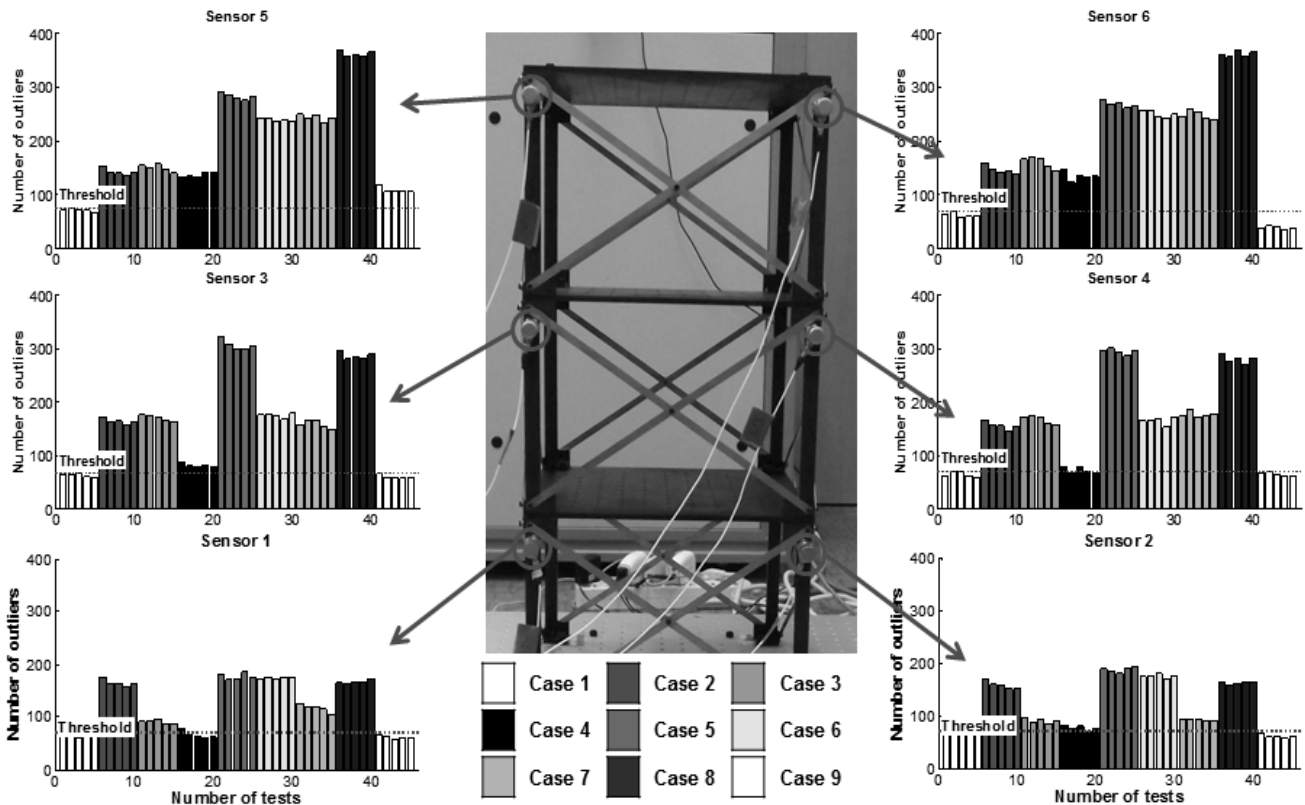


Fig. 4 Result of feature extraction in the time domain

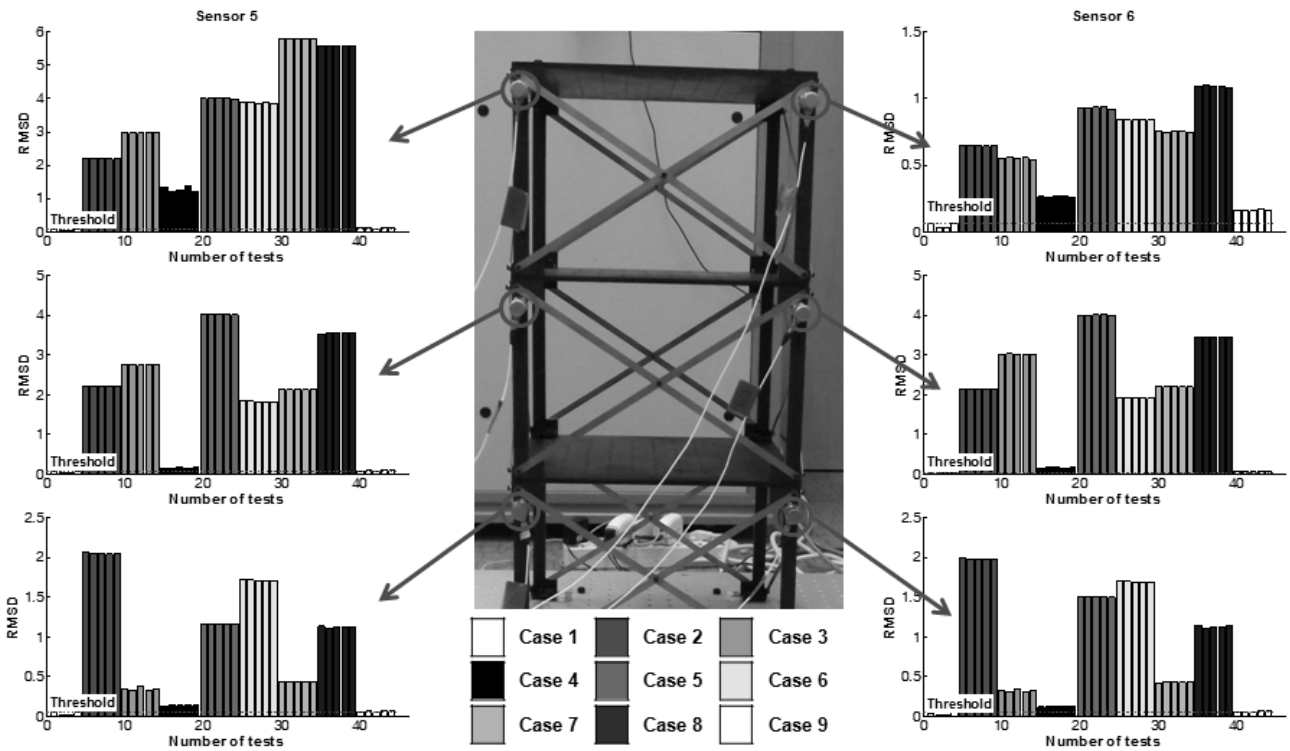


Fig. 5 Result of feature extraction in the frequency domain

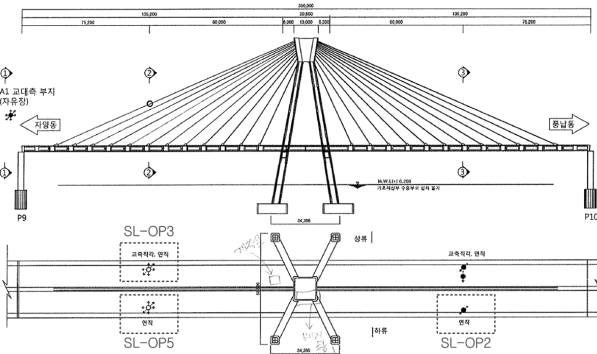


Fig. 6 Installation Location of the seismic accelerometers at Olympic Bridge upper mold

4. 올림픽대교 측정데이터 기반 임계치 설정 알고리즘 검증

4.1 실험 개요

올림픽 대교에서 운영 중인 지진계측 시스템으로부터 획득한 가속도 데이터를 이용하여 알고리즘 검증을 통해 정상/이상거동을 평가하였다. Fig. 6과 같이 올림픽 대교 상판 주형에 설치되어있는 3점의 지진 가속도계 데이터를 이용하여 거동 평가 알고리즘을 검증하였다. 지진 가속도 데이터는 시각이 동기화되어 있으며 다양한 민감도의 가속도계로 10분 간격으

Table 2 Specifications of the earthquake accelerometers

	Sensitivity [G]	Model Name
SL-OP2	2	CMG-5U
SL-OP3	0.5	FBA23
SL-OP5	0.5	FBA ES-T

로 저장하여 구조안전성 평가용으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

계측 시간대 별로 교통량이 다르며, 온도 조건 등이 상이하므로 7월 1일부터 31일까지 계측된 데이터를 비교한 결과, Fig. 7과 같이 각 시간대 별 시간 영역 데이터에서 차량 통행 하중, 풍하중 등 상시 진동 하중에 대한 교량 응답 패턴이 유사한 것을 확인하였으며 동일 시간에 계측된 데이터를 날짜별로 비교하여 비정상 거동을 평가를 수행했다. 설치된 지진 가속도계의 기본 사항은 Table 2와 같다.

4.2 시간영역에서의 알고리즘 수행

계측된 시간 영역 데이터를 x-bar control chart에 적용하여 각 날짜별 이상치를 검출하였다. 7월 1일부터 31일까지의 한 달 간의 데이터에서의 검출된 이상치의 개수를 Fig. 8에 나타내었다. 이상치 개수인 신호 특성을 일반 극치 분포에 적용하여 비정상 거동 여부를 판단하는 임계치를 계산하였다. 이때

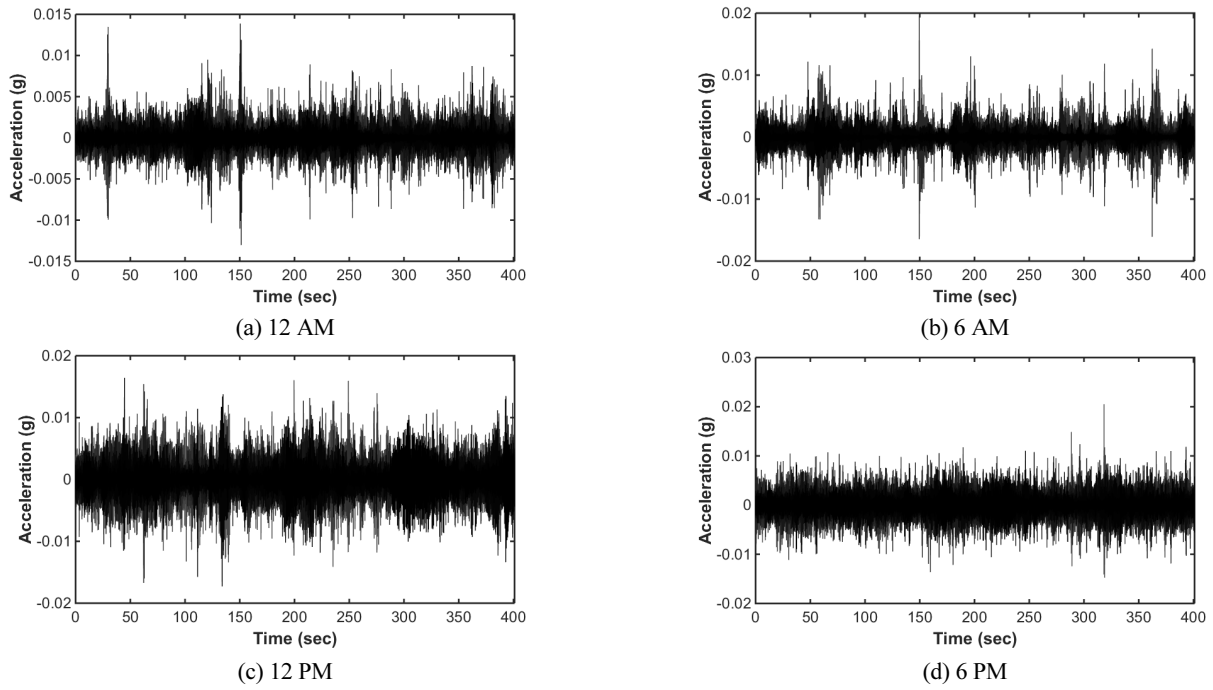


Fig. 7 Nested measuring acceleration at SL_OP2(2014.07.01~31)

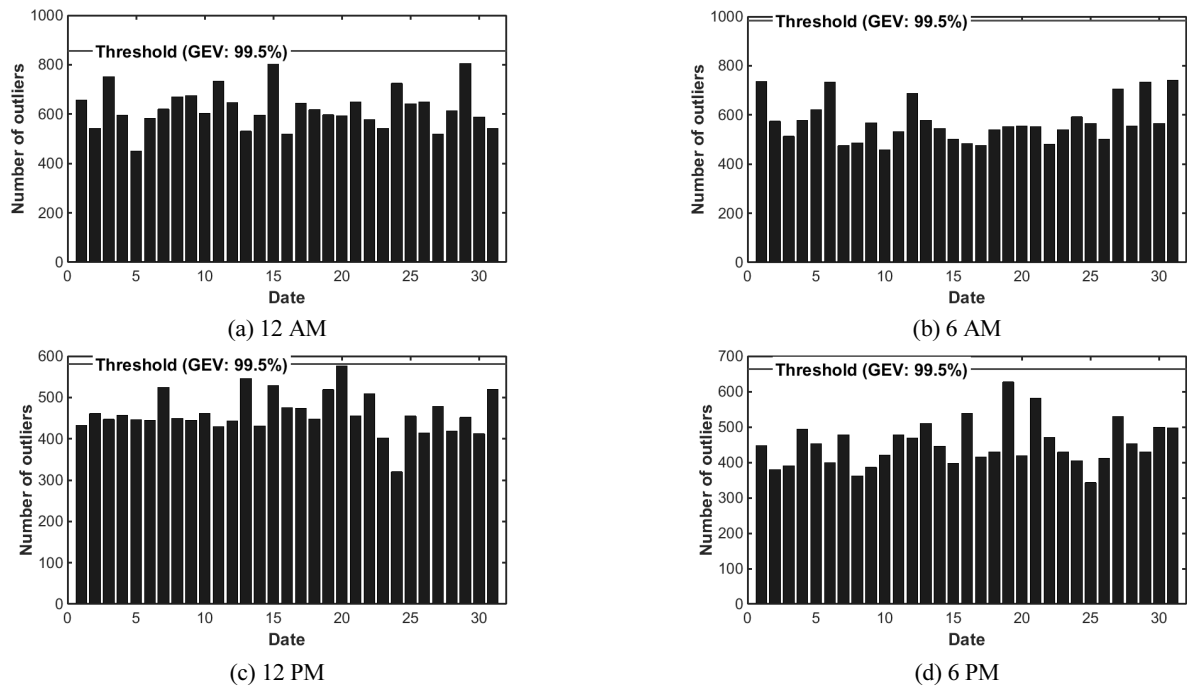


Fig. 8 Result of extracted index and threshold decision at time domain(2014.07.01~31)

의 신뢰 구간은 일반적인 값인 95%를 상회하는 99.5%으로 설정하였으며 정밀도 조절폭을 고려하였다. 모든 계측 지점과 계측 시간대에서 모든 지수가 임계치보다 작게 도출되어 정상 상태로 판단할 수 있다.

4.3 주파수영역에서의 알고리즘 수행

주파수 영역에서의 비정상 거동 평가를 위해 시간 영역 데이터를 푸리에 변환하여 주파수 영역 데이터로 변환하였다. 이 경우에도 시간 영역 데이터에서와 마찬가지로 동일 시간대의 데이터를 일 별로 비교하였다. 이 때 교량의 저차 모드가

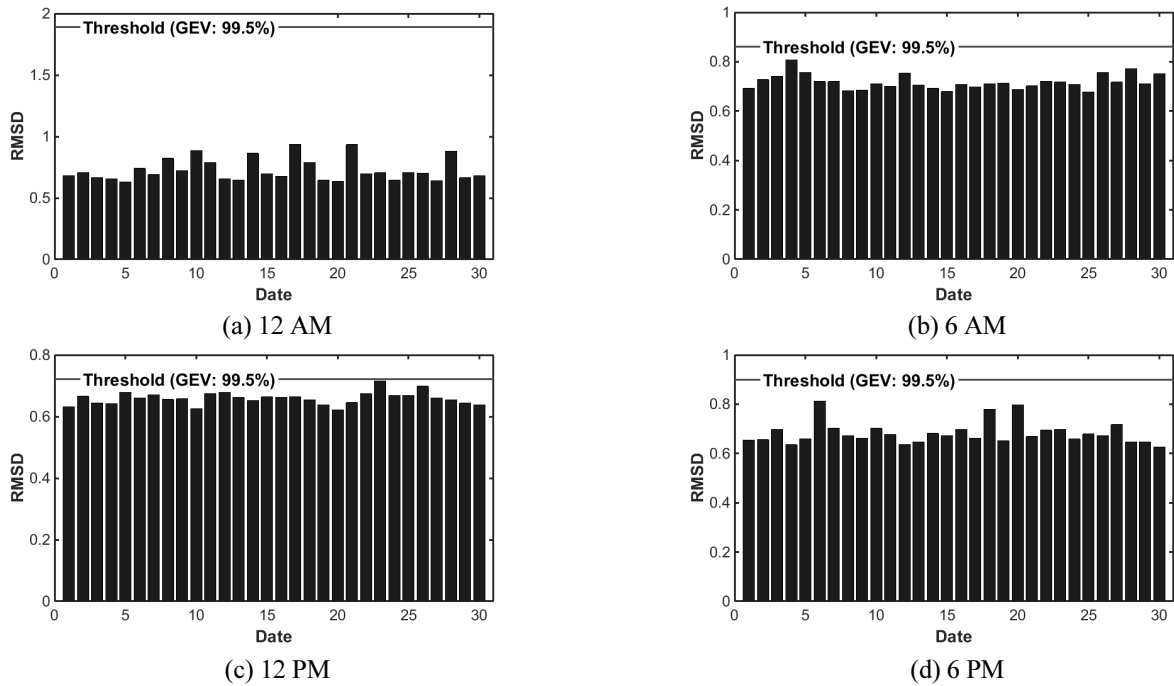


Fig. 9 Result of extracted index and threshold decision at frequency domain(2014.07.01~31)

모두 포함될 수 있도록 비교 주파수 구간은 0~20 Hz로 설정하였다. 주파수 영역 데이터 중 7월 1일 각 시간대 별 데이터를 기준 신호로 하고 7월 2일 이후의 데이터를 RMSD 계산하여 신호 특성을 Fig. 9과 같이 추출하였다. 여기에 일반 극치분포를 적용하여 비정상 거동 여부를 판단하는 임계치를 계산하였다. 이때의 신뢰 구간은 99.5%으로 하였다. 시간영역 평가에서와 마찬가지로 모든 계측 지점과 계측 시간대에서 모든 지수가 임계치보다 작게 도출되어 정상 상태로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 구조별 특성에 따라 비선형적인 관리기준치를 대체하기 위해 Non-model Based Method에서 사용되는 구조 응답의 형태인 가속도 진동응답을 이용하였으며 통계/확률기반의 신호 특성 추출 과정을 거쳐 지수화된 특성을 적용형 임계치 설정 기법에 적용하고 구조 상태를 파악하는 단계로 수행하였다. 또한, 강제진동 실험과 올림픽 대교에서 계측한 데이터에 적용하여 개발한 비정상 거동 평가 알고리즘을 검증하였다.

강제 진동 실험에서 단일 손상과 복합 손상, 정상상태의 재현성을 확인하였으며, 단일 손상의 경우 최하층부의 제외하고 손상 발생 지점에서 지수가 한 계단 상승하는 지수 분포 패턴을 보이며 최하층부인 1층의 지수의 경우 정상상태와 동일

한 분포 형태이나 전 층에서 정상상태 이상의 지수 분포를 갖는 것을 확인하였다. 실제측 데이터 검증 실험에서는 신뢰 구간 99.5%에서 모든 경우에서 지수가 임계치 보다 작게 도출되어 정상 상태로 평가되었음을 알 수 있다.

본 알고리즘을 통해 장기 이력데이터들에 대한 통계분석을 자동적으로 수행할 수 있을 것으로 기대하며, 구조물의 유지관리시 관리기준치 대응으로 활용 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 2016년 주요사업 “한국형 SOC리포트 카드 개발(2차년도)”연구과제에서 수행된 결과로 작성되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Doebbling, S. W., Farar, C. R., Prime, M. B., and Shevitz, D. W. (1998), A Review of Damage Identification Method that Examine Changes in Dynamic Properties, Shock and Vibration Digest, 30, 95-105.
- Fisher, R. A., and Tippett, L. H. C. (1928), Limiting Forms of the Frequency Distributions of the Largest or Smallest Member of a Sample, Proc. Cambridge Philos. Soc. 24, 180-190.
- Huh, Y. C., and Kim, J. K. (2010) A Review of State of the Arts on Structural Health Monitoring System Applied to Bridge and Building

- Structures, Magazine of Korean Society of Steel Construction, KSSC. Oct. 2001, 42-49(In Korean, with English abstract).
- Jo, B. W., Lee, Y. S., Kim, H., and Lee, D. W. (2013), A Study on Development of the Intelligent Bridge Maintenance System using RFID, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 33(5), 2107-2124(In Korean, with English abstract).
- Kim, E. J., Cho, S. J., and Sim, S. H. (2015), A Recent Research Summary on Smart Sensors for Structural Health Monitoring, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(3), 10-21(In Korean, with English abstract).
- Kim, S. Y., Shin, Y. S., and Kim, G. H. (2014), Case Study on the Maintenance of a Construction Monitoring using USN-based Data Acquisition, *The Scientific World Journal*, 2014, 1-11(In Korean, with English abstract).
- Lee, J. J., Park, Y. S., Yun, C. B., Koo, K. Y., and Yi, J. H. (2008), An Overview of Information Processing Techniques for Structural Health Monitoring of Bridges, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK. 21(6). 615-632(In Korean, with English abstract).
- Lee, S. C., Kim, G. S., Ju, M. K., Oh, H. H., and Park, D. H. (2010) Unified Monitoring System for Cable Supported Bridges in Korea, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 14(4), 13-22 (In Korean, with English abstract).
- Sohn, H., Jung, H. J., Kong, J. S., Lee, J. J., and Sim, S. H. (2014), ICT Based Bridge Health Diagnosis and Integrated Maintenance Techniques, *Magazine of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 18(1), 1-4(In Korean, with English abstract).

Received : 07/23/2015

Revised : 06/25/2016

Accepted : 06/27/2016

요 지 : 최근의 건축물은 복합적인 기능과 형태를 보이고 있으며, 크기가 거대해짐에 따라 구조물 건전성 감시(Structural Health Monitoring)기술의 수요 또한 증가하고 있다. 구조물마다 고유한 동특성을 가지고 있으며, 다양한 외력의 영향을 받기 때문에 구조물의 건전성을 평가하는 다양한 방법들이 연구되고 있다. 전문가에 의지하여 접근 가능한 지점에 대한 육안 검사 및 비파괴 검사를 벗어나 사각지대가 없는 온라인 계측 시스템의 구비와 함께 자동으로 위험요소를 검출하는 시스템이 요구되고 있다. 본 연구에서는 비선형적인 구조물의 응답을 고려하기 위해 관리도 기법, 평균제곱근편차, 일반 극치 분포 등과 같은 통계적 기법을 이용하여 이상거동을 판별에 활용할 수 있는 신호 특징 추출과 적응형 임계치 설정 알고리즘을 제안하였으며, 강제진동 실험과 실제 운용중에 있는 구조물의 지진 계측 시스템의 가속도 응답을 이용하여 성능을 검증하였다.

핵심용어 : 구조물 건전성 감시, 이상거동, 진동 응답, 장기모니터링, 적응형 임계치
