

HHT를 이용한 이상거동 시점 추정 기법 개발

Development of Abnormal Behavior Monitoring of Structure using HHT

김 태 현^{1)*} 박 기 태²⁾
Tae-Heon Kim Ki-Tae Park

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 increasing. Various SHM techniques have been studied for buildings which have different dynamic characteristics and influenced by various external loads. "Abnormal behavior point" is a moment when the structure starts vibrating abnormally and this can be detected by comparing between before and after abnormal behavior point. In other words, anomalous behavior is a sign of damage on structures and estimating the abnormal behavior point can be directly related to the safety of structure. Abnormal behavior causes damage on structures and this leads to enormous economic damage as well as damage for humans. This study proposes an estimating technique to find abnormal behavior point using Hilber-Huang Transform which is a time-frequency signal analysis technique and the proposed algorithm has been examined through laboratory tests with a bridge model using a shaking table.

Keywords : Structural health monitoring, Hilbert-huang transform, Abnormal behavior, Vibration response, Analysis of variance, Edge detection

1. 서 론

최근의 건축물은 복합적인 기능과 형태를 보이고 있으며, 크기가 거대해짐에 따라 구조물 건전성 감시 (Structural Health Monitoring) 기술의 수요가 증가하고 있다. 건축물은 복잡한 재료로 구성되어 있고, 다양한 외력의 영향을 받기 때문에 건전성을 평가하는 다양한 방법들이 연구되고 있다.

구조물의 전역적 (Global) 건전성 평가 방법으로 많은 연구에서 가속도 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 구

성하기 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. 이처럼 손상의 전과 후가 명확히 구분되어야 정확한 판단과 진단이 가능하다. 또한, 신호 변화 특성의 추출을 위해 푸리에 변환법 (Fourier Transform, FT)을 사용하는데 수행 도중 시간 정보가 삭제되어 손상에 기인한 동적 특성의 변화를 찾기에 부적합하다. 게다가 FT는 기본적으로 신호가 안정되어 있는 선형 구간의 무한 반복이라는 가정으로 두고 있어 비정상 (Non-Stationary) 신호의 변환 시 시간 정보가 소실되는 문제가 있다 (Lee and Choi, 2007).

손상의 시점을 특정하지 못하는 주파수 분석 기법의 단점을 극복하기 위하여 시간-주파수 신호분석 기법들이 제안되었는데, 그중에서 가장 많이 사용되는 기법으로는 웨이블릿

1) 정회원, 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구원, 교신저자
2) 정회원, 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구위원

* Corresponding author : taeheon@kict.re.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

변환 (Wavelet Transform, WT)과 힐버트-황 변환 (Hilbert-Huang Transform, HHT)이 있다.

WT은 시간에 따라서 변화하는 주파수 성분을 확인 할 수 있어 작동하는 시스템의 결함 분석이나 실시간 영상처리 등의 목적에 널리 사용되고 있다.

1998년 Huang에 의해 개발 및 발표된 HHT는 비선형, 비정상 신호의 처리에 유용하다 (Huang et al., 1998).

Peng et al.에 의해 WT에 보다 비선형 신호 분석에 더 정확한 결과를 제공하는 것이 입증되었으며, WT은 비교적 크기가 큰 데이터를 분석하는데 시간이 많이 걸리고, 표현된 주파수 성분간의 간섭에 의한 경계 왜곡 현상이 발생하고 해상력도 역시 떨어지는 것으로 나타났다 (Peng et al., 2005).

이상거동 시점이란 구조물이 비정상 (Abnormal)으로 진동하는 시점으로 상시 계측기를 운용하는 초장대 교량이나 초고층 빌딩과 같은 대형 사회기반시설물의 경우 하루에도 수십 수백 기가바이트에 해당하는 데이터가 수집되고 있으며 이를 전부 감시하는 일은 쉽지 않게 된다. 이상 거동은 손상을 유발하고 이는 곧 막대한 경제적 피해 및 심각한 인명 피해로 이어지므로 본 연구에서는 HHT를 이용하여 이상거동 시점 추정 기법을 제안하고 진동대를 이용한 축소 교량 모형을 통해 실시간 손상이 유발된 데이터를 이용하여 이상 거동 시점 추정 기법의 검증을 수행하였다.

2. 이상거동 시점 추정 기법 제안

구조물마다 고유한 동특성을 가지고 있으며, 외력이나 노후 등 이상거동이 발생한 이후 질량이나 강성의 손실로 변화하게 된다.

지금의 방법은 손상과 무관하게 연속적으로 계측되는 데이터를 스케줄에 따라 일정 구간으로 구분하여 공진 주파수의 변화나 진폭 변화를 평가한다. 따라서 공진 주파수의 차이가 크게 두드러지지 않는 한 관찰되지 않고, 진폭 변화는 사소한 외력에도 반응하는 경우가 많아 지속적인 감시가 어려운 상황이다.

따라서 손상을 명확히 검출하기 위해서는 이상거동의 시점을 기준으로 전과 후를 비교하여야 한다. 이상거동은 구조물 손상의 이상 징후이며 정확한 이상거동 시점의 추정은 구조물의 안전과 직결될 수 있다.

본 연구에서 제안하는 이상거동 시점 추정을 알고리즘을 Fig. 1과 같이 도식화하였다. 분석이 필요한 데이터는 어떤 구조물의 가속도 응답 이력으로 힐버트-황 변환 기법의 경험

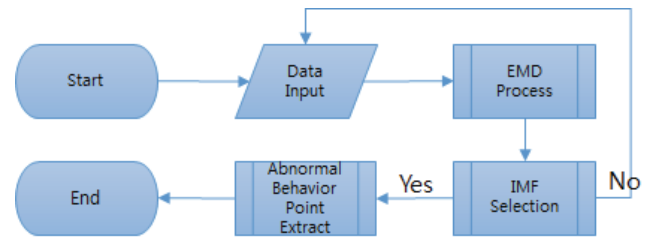


Fig. 1 Abnormal Behavior Monitoring Algorithm

적 모드 분해기법을 통해 내부 모드 함수들 (Intrinsic Mode Function, IMF)로 분리하고 변량분석을 통해 여러 IMF 중 대표 IMF를 결정한 후 대표 IMF의 경계 탐색을 수행을 통해 이상거동 시점을 추정하게 된다.

변량 분석을 통해 IMF를 선택할 수 없는 경우는 IMF들의 변량이 서로 유사한 경우로 신호에서 손상을 탐지할 수 없는 경우를 나타낸다.

2.1 힐버트-황 변환

HHT의 핵심기술은 EMD로 주기, 정상인 신호는 물론 자연현상에서 얻을 수 있는 일반적인 비주기, 비정상 신호를 여러 개의 단일신호인 내부 모드 함수로 분리하는 기능을 수행한다. IMF는 각 주기에서 0을 교차 (zero-crossing)하고, 하나의 모드에 관해 다른 복잡한 파형을 포함하지 않는 신호로, HT에 부적합한 시계열 데이터에서 적합한 형태 (Single Oscillation 형태)의 IMF들과 잔차 (residual)로 분리하여 시간과 주파수영역에서 관찰할 수 있도록 변환하는 기법이다.

EMD를 수행하는 방법은 다음과 같다. 신호 $s(t)$ 의 최대값과 최소값을 각각 연결하여 포락선 (envelope curve)를 생성하여, 최대경계선과 최소경계선을 만든다. 최대경계선과 최소경계선의 평균선인 m 을 구하고, 식 (1)과 같이 s 와 m 의 차로 IMF인 C_{1k} 를 구한다. 여기서 1은 첫 번째 IMF를 의미하고, k 는 IMF의 조건을 만족하기 위한 연산의 반복횟수 (shifting)이다.

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= s(t) - m_{11} \\
 C_{12} &= C_{11} - m_{12} \\
 &\vdots \\
 C_{1k} &= C_{1k} - m_{1k}
 \end{aligned} \tag{1}$$

C 가 IMF의 조건을 만족할 때까지 새로이 C 의 포락선을 생성하여 m 을 빼는 것을 반복한다. 이때, 무분별한 반복연산 과정은 신호의 특성까지 없애버릴 수 있으므로 식 (2)와 같

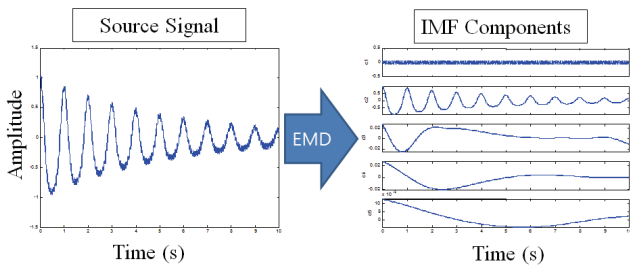


Fig. 2 EMD result

이 표준 편차 (Standard Deviation, SD)에 제한을 둔다. 일반적으로 이 표준편차의 제한은 0.2~0.3의 값을 가진다.

$$S.D. = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|C_{1(k-1)}(t) - C_{1k}(t)|^2}{C_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (2)$$

첫번째 IMF인 C_{1k} 가 구해지면 원 신호 $s(t)$ 에서 분리해 내고, 다시 식 (1)과 (2)를 반복하여 나머지 IMF를 구한다. 이때, 원 신호 $s(t)$ 는 비정상-비선형 신호이므로 IMF의 조건을 만족하지 못하는 신호가 남게 되며 이를 잔차 (residue) 신호라고 하며 모든 EMD수행을 종료한다. 이렇게 시계열 데이터에서 추출한 각 IMF들과 잔차의 합성을 통해 다시 원본데이터로 합성이 가능하다. 각 IMF는 고주파에서 저주파 형태로 추출되며 경험적 방법이기 때문에 신호에 따라 분해되는 IMF의 수량도 다르다. Fig. 2에서는 EMD 수행 결과의 예제를 보여주고 있다.

2.2 변량 분석

EMD기법은 이름 그대로 모드를 분리하는 기법이므로 원본 신호가 복잡할수록 더 많은 IMF로 분해될 가능성이 높으며, 수학적 이론이 아닌 경험적 방법이기 때문에 몇 개의 IMF가 나올지 EMD를 수행하기 전까지 알 수 없으며, 표준 편차에 설정에 의해서도 많은 영향을 받는다. 따라서 다수의 EMD 중 원본 신호의 변화를 대변하는 즉, 각 모드들 중 이상 거동 정보를 가지고 있을 IMF를 선정해야 한다.

변량분석 (Analysis of Variance)은 특성값의 변동을 나타내는 제곱합을 요인별 제곱합과 오차에 의한 제곱합으로 분해하고 이들의 비를 통계량으로 하여 요인의 유의성을 검증하는 통계적 기법으로 (Kim and Jun, 1997) 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$SS_{total} = SS_{between} + SS_{within} \quad (3)$$

여기서 SS는 Sum of Square값을 의미하며 전체 제곱합은 집단간 제곱합과 집단내 제곱합의 합으로 구성된다.

하나의 IMF는 하나의 집단이므로 각각의 IMF들이 전체 신호에 미치는 영향력을 통계적으로 평가할 수 있다. 각각의 IMF들의 변량 특성 비교를 통해 이상거동 신호가 포함된 IMF를 구분할 수 있으며, 반대로 이상거동이 없는 상태를 판단할 수 있다.

2.3 경계 탐색

이상거동 시점의 순간가속도는 급변하므로 경계 (Edge)를 형성하게 되므로 이러한 경계가 형성되는 시점이 이상거동 시점이라 할 수 있다. 본 연구에서는 1986년 John Canny가 발표한 “Edge Detection” 방법을 이용하여 그 시점을 추론하려 한다 (Canny, 1986).

일반적으로 “캐니 에지 (Canny Edge)”라고 부르는 이 방법의 기본적인 원리는 다음과 같다.

- ① 가우시안 스무딩 필터링
- ② 신호의 기울기 계산
- ③ 기울기의 강도를 계산
- ④ 히스테리시스 수행

잡음 제거를 위해 신호를 먼저 완만하게 근사시킨다. 그런 다음에 높은 공간 변화를 갖는 영역들을 분명히 하기위해 기울기를 찾는다. 이어서 이러한 영역들을 추적하여 최대가 아닌 시점을 삭제한다. 히스테리시스에 의해 기울기 배열은 계속 축소된다. 히스테리시스는 삭제되지 않은 나머지 시점들의 추적에 사용된다.

히스테리시스는 Fig. 3과 같이 어떤 A의 변화에 따라 다른

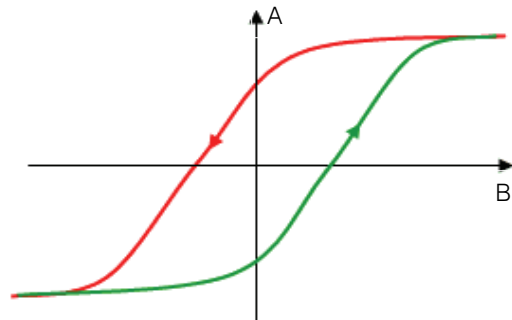


Fig. 3 Hysteresis

B가 변화하는 경우, A를 변화시키는 경로에 따라 같은 A값에 대한 B값이 달라지는 현상이다.

히스테리시스는 두 가지 임계를 사용하는데 크기가 첫 번째 임계보다 작다면 예지가 아닌 것으로 0으로 설정된다. 만일, 크기가 높은 임계보다 크다면 예지로 간주된다. 크기가 2가지 임계 사이에 있으면 이 화소로부터 두 번째 임계보다 큰 기울기를 갖는 하나의 시점까지 경로가 존재하지 않으면 0으로 놓는다.

본 연구에서는 노스캐롤라이나대학교의 CISMM연구실에서 공개한 “Edge Detector 1D” 소스를 이용하였다 (CISMM, 2007).

3. 이상거동 시점 추정 기법 검증

3.1 실험설계

구조물의 이상 거동을 재현하기 위하여 Fig. 4와 같이 사각형 형태의 교량 모형을 제작하고 진동대를 이용하여 강제 진동 시험을 수행하였다.

교량의 중심을 기준으로 좌우로 각각 2mm씩 도합 4mm의 범위를 3Hz로 약 2분간 가진하였다. 구조물의 이상거동 (손상)을 모사하기 위하여 강제 가진이 진행되는 도중 60초 부근에서 주탑과 주경간 중앙에 연결된 케이블 12개 중 1개를 완전히 잘라 100%의 케이블 손상을 발생하였다.

가속도 응답의 측정은 측경간의 중앙부 하단에 $\pm 2G$ 센서를 지면과 수직방향으로 부착하고 200Hz로 계측하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같으며 육안으로는 손상이 발생한 시점을 특정하기 어렵다.

3.2 이동시점 추정 결과 분석

계측한 가속도 응답 신호를 EMD기법으로 Fig. 5와 같이 IMF들로 분리하였다. 상단부터 우측의 순서로 IMF1, 2, 3, ..., 10이며, 11~25번은 지면상 생략하였다. 각 IMF는 고주

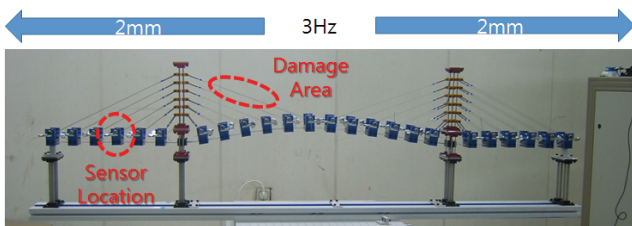


Fig. 4 A cable-stayed bridge type model

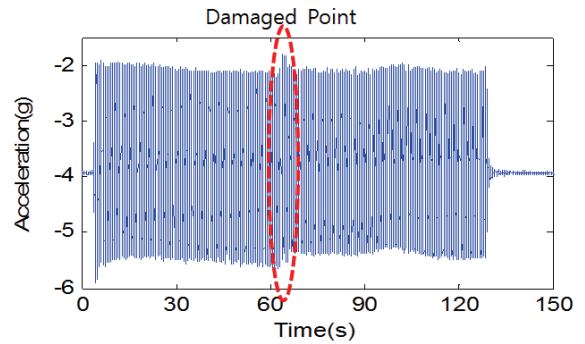


Fig. 5 Response signal (Vibration)

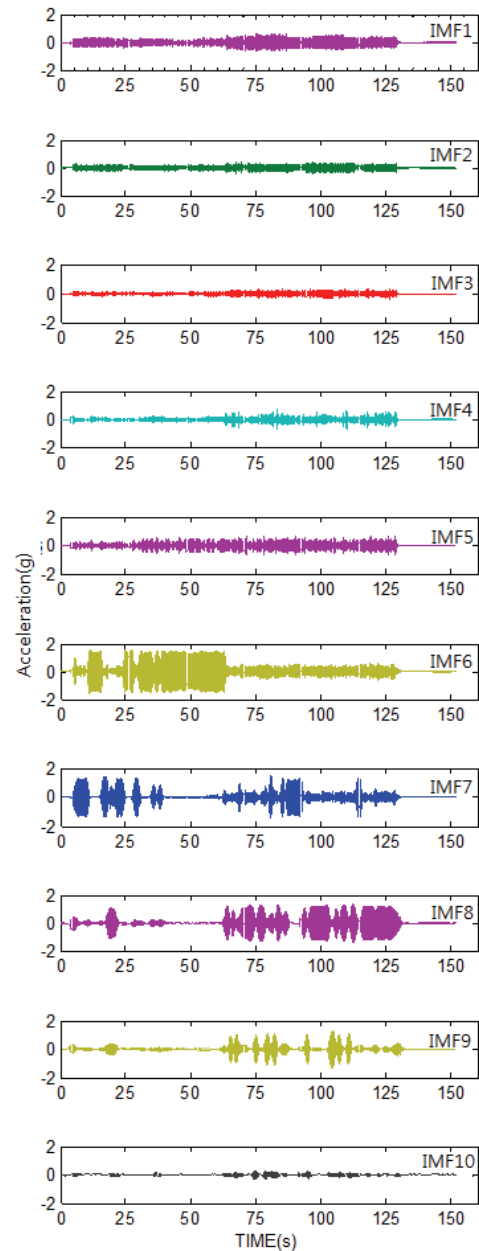


Fig. 6 IMFs (No.1~10)

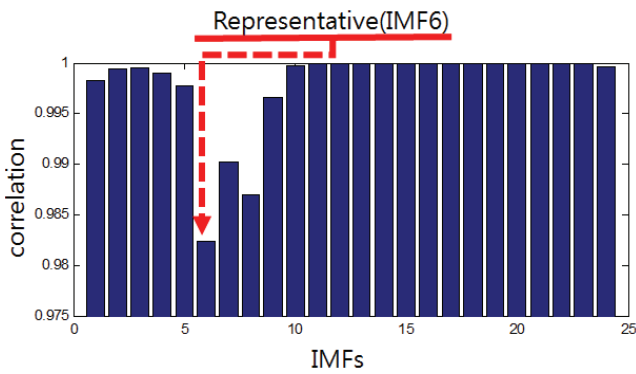


Fig. 7 Results of analysis of variance

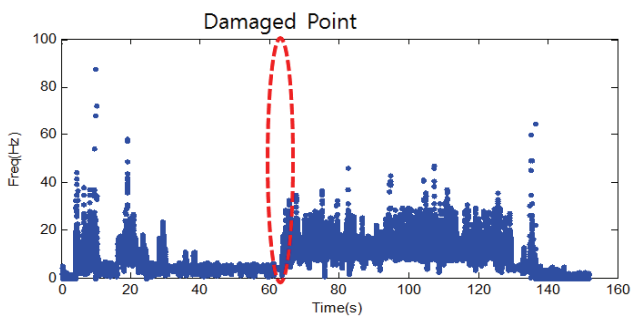


Fig. 8 Representative (IMF6)

파 신호부터 저주파 신호의 순서로 분리되었다.

분리된 각 IMF의 변량분석을 수행하여 Fig. 7과 같은 각 IMF별 변락을 도식화 하였으며 IMF6, 8, 7, 9의 순서로 다른 IMF와 변화량의 차이를 보여주고 있다. 본 실험에서는

변화량의 차이가 가장 큰 IMF6을 대표 IMF로 선정하였다.

선택된 IMF6을 HT한 결과는 Fig. 8과 같으며 Fig. 5에 비해 케이블 절단 시점을 명확하게 구분할 수 있다.

경계 탐색기법으로 IMF6의 이동거동 시점 탐색결과, Fig. 8과 같이 총 59개의 시점이 검출되었으며, 이상 거동시점을 포함하고 있는 것을 확인하였다. 이들 중 유효하지 이상거동 시점인 9개의 지점을 제외하면, 약 84%의 정확도를 확인할 수 있다.

5초 부근의 첫 이상거동 시점은 진동대가 가진을 시작하는 시점이며, 60초 부근의 시점은 외력에 의해 교량의 케이블이 절단된 시점이고, 135초 부근의 시점은 진동대의 가진이 끝나는 시점으로 확인하였다.

이상 거동 시점인 60초를 기준으로 Fig. 9와 같이 원본 신호 (A)와 이상거동 전 (B)과 후 (C) 신호의 주파수 성분을 비교하였다. 단일 거동 하에 측정된 신호이기 때문에 전체적인 공진주파수를 얻을 수는 없지만 A에서는 2.2, 4.3, 6.5, 8.6, 10.8, B에서는 2.6, 5.2, 7.8, 10.4, C에서는 3.7, 7.4, 11.1의 성분 (Hz)이 두드러져 A와 B, A와 C의 경우는 유사점을 찾을 수 있었지만 B와 C를 비교할 때, 전혀 다른 주파수 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 사용한 실험데이터는 200Hz의 샘플링레이트로 기록되고, 가진시 발생하는 고주파 잡음이 발생하여 짧은 시간의 데이터지만 수행시간은 약 507.02초로 상당한 시간이 소요되었다. 하지만 데이터를 반으로 잘라 연산할 경우 총수행시간이 383.61초로 줄어들었으며, 4등분한 경우는 247.97

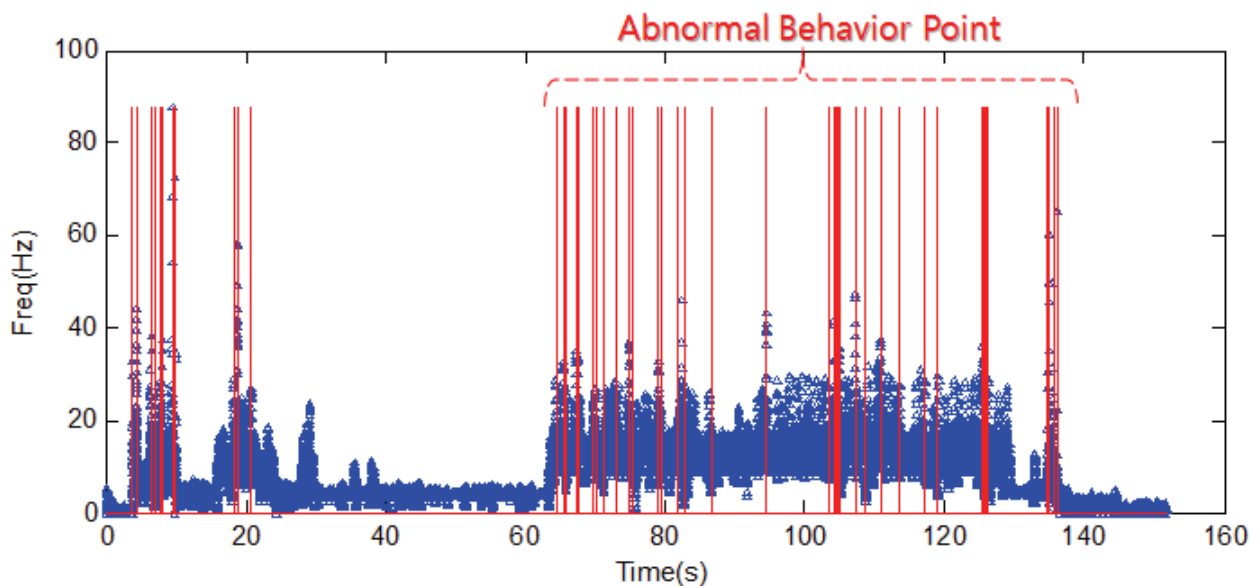


Fig. 9 Estimated abnormal behaviors

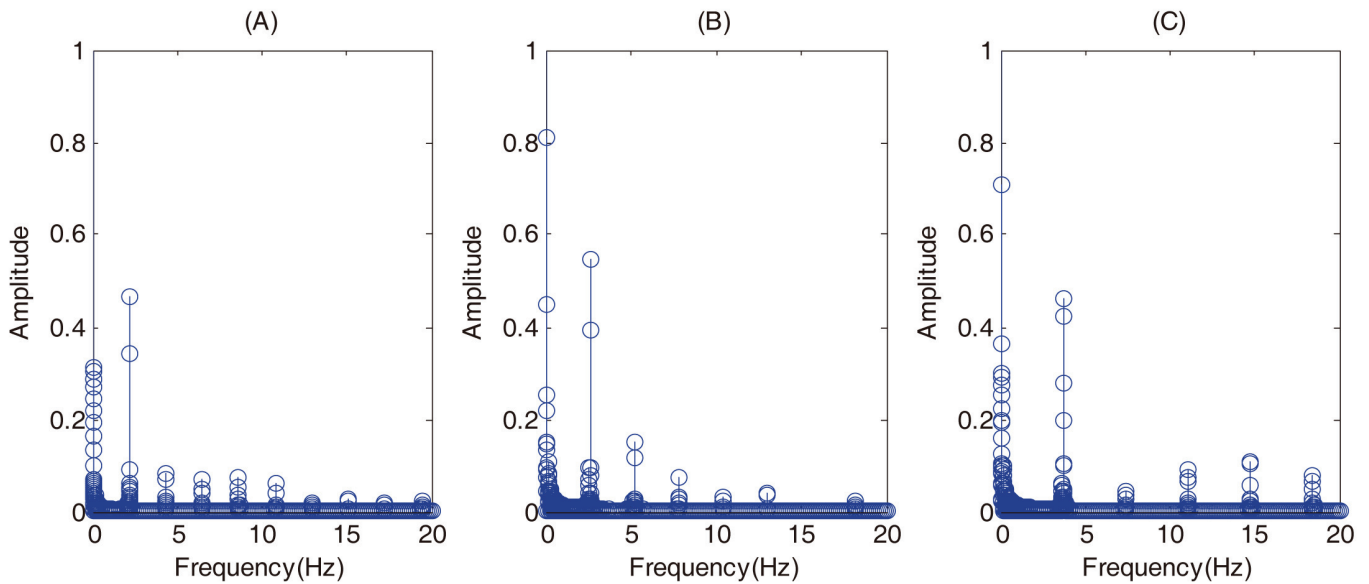


Fig. 10 Comparison between before and after abnormal behavior point in frequency domain
(A) Original (B) Before (C) After

초로 각각 76%, 49% 수준으로 확인되었다.

이는 데이터 수량에 따라 최대경계선과 최소경계선을 생성할 때 수행하는 Spline 연산량이 많아져 발생하였고, 하나의 센서를 시간에 흐름에 따라 지속적으로 발생하는 대량의 데이터를 감시하기 위해서는 신호를 적절한 크기로 분할하여 연산을 수행해야 한다. HHT의 대표적인 단점인 spline 연산 오류 (시작점과 끝점 오류)를 적절히 대처해야 한다. EMD 수행시 결정하는 포락선을 그릴 때 처음과 마지막의 값이 없기 때문에 자칫 발산하는 경우가 있고 잘못된 주파수 값으로 이어질 수 있으므로 “Mirror Extending and Circular Spline Function”의 사용을 권장한다 (Zhao and Huang, 2001).

4. 결론

본 연구는 구조물의 이상거동 감시를 위해 HHT기법을 활용하여 손상 시점 추정 기법을 제안하였으며, 교량 모형을 이용한 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

- (1) 가속도 응답 신호를 HHT할 경우 IMF와 잔차로 분해되며, IMF의 수는 신호의 복잡도에 따라 그 수량이 달라지고, 각 IMF는 변량분석을 통해 손상 신호가 포함된 IMF를 구별해 낼 수 있다.
- (2) HHT된 신호에서 경계 검출을 통해 순간주파수가 급격히 변화하는 부분을 추출할 수 있으며, 이 부분은 이

상 거동 시점과 동일하다.

- (3) HHT 수행시 신호가 길수록 Spline 연산량이 늘어나게 되며, 적절한 길이로 분할하면 시점 추정 효율이 상승할 것으로 사료된다.
- (4) 추정된 이상 거동 시점은 약 84%의 정확도를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음 (10040911, 건축/대형구조물의 안전관리를 위한 내외피용 IT기반 고정밀도 패치/임플란트시스템 기술 개발).

References

1. Canny, J. (1986), A computational approach to edge detection, IEEE PAMI, 8(6), 679-698.
2. CISMM (2007), Edge Detector 1D, Available at: <http://www.cs.unc.edu/~nanowork/cismm/download/edgedetector/index.html> (Accessed 10 October 2014).
3. Doebling, 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.
4. Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., Liu, H. H., (1998), The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum

for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London*, 454, 903-995.

5. Kim, K. Y., Jun, M. S. (1997), Multivariate statistical analysis, Freedom Academy, Korea (in Korean).

6. Lee, S. M., and Choi, Y. S. (2007), Fault Diagnosis for Rotating Machinery with Clearance using HHT, The 2007 fall conference of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 1-8 (in Korean, with English abstract).

7. Peng, Z. K., Tse, P. W., and Chu, F. L., (2005), A Comparison Study of Improved Hilbert-Huang Transform and Wavelet Transform: Application to Fault Diagnosis for Rolling Bearing,

Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 974-988.

8. Zhao, J., and Huang, D. (2001), Mirror Extending and Circular Spline Function for Empirical Mode Decomposition Method, *Journal of Zhejiang University, Science*, 2(3), 247-252.

Received : 06/17/2014
 Revised : 10/22/2014
 Accepted : 10/28/2014

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. 이상거동 시점이란 구조물이 비정상적 (Abnormal)으로 진동하는 시점으로 손상을 명확히 검출하기 위해서는 이상거동의 시점을 기준으로 전과 후를 비교하여야 한다. 즉, 이상거동은 구조물 손상의 이상 징후이며, 정확한 이상거동 시점의 추정에는 구조물의 안전과 직결될 수 있다. 이상 거동은 손상을 유발하고 이는 곧 막대한 경제적 피해 및 심각한 인명 피해로 이어지므로 본 연구에서는 시간-주파수 신호분석 기법인 힐버트-황 변환을 이용한 이상거동 시점 추정 기법을 제안하고 진동대를 이용한 모형실험을 통해 제안한 알고리즘의 검증에 수행하였다.

핵심 용어 : 구조물 건전성 감시, 힐버트 황 변환, 이상거동 시점, 진동 응답, 변량분석, 경계 검출