한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 583~589.

구조물 결함 탐지에 관한 진동학적 접근방법

⁰박남규*. 박윤식*

A Survey on Vibration Signal Based Damage Detection Methods

Nam-Gyu Park* and Youn-sik Park*

Abstract

For several decades many researchers have studied various algorithms, known as non-destructive testing, to identify abnormalities within a structure. Damage detection technique using vibration signal is a kind of these methods. Many researchers have published lots of papers dealing vibration signal to identify structural damage. All the methods for damage detection using vibration signal can be divided into two big categories. The first category is the method that requires some reference model such as finite element model, and the second is the method that does not require any reference model but needs only experimental data. This paper will be devoted to classify damage detection methods that utilize vibration signal.

1. 서론

구조물이나 각종 산업 장비의 활용은 반드시 안전성을 고려하여야 한다. 또한 구조물이 본래의 기능을 발휘하는지를 가늠하는 작업도 매우 중요하다. 특히 원자재나 구조물이 본래 기능을 상실하지 않도록 물리적인 이론이나 현상등을 응용하여 검사하는 작업을 비파괴 검사 라고 한다. 비파괴 검사의 역사는 거의 기원전으로 소급하여 아르키메데스가 부력의 원리를 이용하여 순금으로 된 왕관을 가려내는 역사적 사건 까지로 보는 견해도 있을 만큼 매우 오래된 분야이다[1]. 물론 현재에 와서는 육안관측은 물론이려니와 X 선이나 초음파, 전자기력 등을 이용하여 제품이나, 자재의 결함을 탐지하는 작업을 하고 있다. 한편 학계에서는 이러한 비파괴 검사의 기준을 만들어 보다 보편적이고 체계적인 산업기술로 정립하려는 노력을 기울여 왔으며 미국의 경우 ASTM(American Society for Testing and Materials)에서는 비파괴 검사를 위한 분과를 만들어 오랜 기간동안 규격화 작업을 진행하였다[2].

*한국과학기술원 기계공학과

한편 물질의 현상중의 하나인 진동의 물리적인 특성을 이용한 검사 방법이 최근 몇 십년에 걸쳐서 독자적인 영역을 구축하여 왔다. 진동 현상은 물질의 질량과 강성으로 비롯되며, 만일 재질에 이상이 발생하여 질량 혹은 강성이 변하였을 때는 본래의 진동과는 다른 양상으로 운동함을 관측할 수 있다. 그러나 현재 이러한 현상을 바탕으로 하는 검사는 결정학적인 규모에서 논의 할 수 있는 미시적인 이상진단의 판별여부확인은 개발이 미진한 상태이다. 또한 대부분의 진동을 이용한 검사의 난점 중 하나는 반드시 결함이 없는 원형 구조물의 모델이 필요하다는 것이다. 이 모델은 완벽하게 구조물의 거동을 묘사할 수 있어야 함은 물론이다. 이와 관련하여 구조물의 모델을 개발하여 구조물의 동특성을 완벽하게 재현할 수 있도록 연구하는 분야가 상당히 오래 전부터 연구 되었으며 모형 개선(model updating)이라는 진동학의 또 다른 분야로 잘 알려져 있다.

진동 현상을 연구 하였던 많은 연구자들에 의해 개발된 검사 방법은 다양한 방법을 이용하고 있다. 대개 이러한 방법들은 몇 개의 큰 부류로 나누어 볼 수가 있다. 본 논문은 이 방법들을 분류하고

각 방법의 간단한 소개와 적용방법에 관하여 논할 것이다.

먼저, 여러 방법을 크게 두 가지의 범주로 엮어보면 구조물의 수학적 모델이 필요한 것과 필요하지 않은 것으로 나눌 수 있겠다. 진동을 기반으로 하는 분야는 대개 수학적 모델이 필요하고 많은 방법들이 수학적 모델을 기반으로 하여 수립되었다. 반면에 수학적 모델이 필요 없는 방법들은 실험에 의한 신호를 분석하여 해석하는 분야로 소수의 그룹에 의해 연구 되고 있다. 참고로 후자의 방법은 초음파나, X 선 을 이용한 기존의 비파괴 검사에서 주를 이루고 있다.

2.수학적 모델을 이용한 방법

2.1 힘 균형 방법(force balance method)

구조물의 모델은 통상 유한요소 모델을 쓰고 있으며, 여기에 기반을 둔 방법들이 매우 많이 개발되었다. 이는 진동이라는 분야가 모델 개선이라는 기존 이론 체계에서 많이 연구 되었기 때문으로 사료된다. 이 개념을 이용하면 문제를 매우 간단하게 정의 할 수 있으나 구조물의 모델을 매우 엄밀하게 세워야 하는 어려움을 감수 하여야 한다.

힘 균형 방법(force balance method)은 수학적 모델을 기반으로 하는 방법들 중에서 가장 대표적인 방법이다. 즉 결함발생 전의 유한차원의 수학적 모델에 결함발생후의 모드벡터 혹은 주파수 응답 함수를 곱하여 힘의 균형이 깨지는 위치를 구조물의 결함지역으로 보았다. 즉 다음의 식으로 표현할 수 있으며

$$([K]-\bar{\lambda}_i[M])\{\bar{\phi}_i\}=([\Delta K]-\bar{\lambda}_i[\Delta M])\{\bar{\phi}_i\} \qquad (1)$$

여기서 $[K]$와$[M]$ 은 각각 강성과 질량을 나타내는 항이며 $\bar{\lambda}_i$ 와 $\{\bar{\phi}_i\}$는 i 번째의 고유치와 고유벡터가 구조물의 결함($[\Delta M]$,$[\Delta K]$)의 발생으로 인하여 변화한 양이다.

이 분야에서 Zimmerman 과 그의 동료들의 연구가 활발하다[3~5].

그러나 이 방법의 적용을 위해서는 식(1)에서 보듯이 모드 벡터의 모든 자유도 정보를 알아야 하는 번거로움이 따른다. 이러한 경우 모델의 축약이나 모드 확장을 통한 방법을 많이 이용하고 있다. 특이할 만한 방법으로는 스트레인 신호를 이용해 스트레인 신호를 적분하여 회전자유도에 해당하는 모드 거동을 예측하여 보(beam)에 적용한 예도 있다[6].

부수적인 문제로 결함의 정도를 파악하기 위한 방법은 Zimmerman 을 위시한 그룹에서 MRPT(Minimum Rank Perturbation Theory)를 개발하여 적용하였다. 또한 Ricles, Kosmatka 는 민감도 해석을 통한 최적 설계 문제를 정의하여 설계변수의 변화를 결함의 정도를 파악하고 있다[7].

식(1)에서는 모드 벡터를 이용하였으나 주파수 응답함수를 대입하여도 똑같은 원리에 의해 결함 지역을 파악할 수 있다. 그러나 모드 영역에서와 다르게 주파수 영역의 정보를 이용하므로 보다 많은 정보를 확보할 수 있는 장점이 있다. 또한 모드 벡터를 추출하는 과정(curve fitting)이 없고, 잡음의 영향이 적은 주파수를 이용할 수 있다는 점에서 매우 유용하다고 할 수 있다[8~10].

이를 기본 틀로 하여 약간 변화된 방법들이 소개되고 있으며 Waters 는 주파수 응답 함수 외에 고유치 방정식을 만족하는 해를 이용해 가중치의 개념을 도입하여 적용하고 있다[11]. 그러나 이들 모든 방법 역시 수학적 모델이 필요하므로 매우 엄밀한 모델의 도입이 필수적이고, 수학적 모델과 실험 결과의 좌표의 불일치를 극복하기 위해 모델에 대한 실험결과의 확장이나, 실험 결과에 대한 모델의 축약을 이용해 풀어야 한다.

2.2 오차행렬(error matrix)을 이용한 방법

결함 전후의 강성 행렬 혹은 질량 행렬의 상대적 차이를 비교하여 오차가 발생한 위치와 그 크기를 동시에 확인할 수 있는 방법이다. 초기에 모델 개선을 위해서 도입되었고 후에 결함의 탐지에

이용되어 왔다[12,13]. Lieven, Ewins 는 이 방법을 이용할 때 발생하는 몇 가지 문제점을 제기 했으며, 여러 개의 모드보다는 상관관계가 상대적으로 우수한 소수의 모드를 이용함이 바람직하고, 가능하면 많은 수의 측정점을 고려하는 것이 오차를 줄일 수 있다고 강조하였다[14].

오차 행렬의 원리는 결함 발생 전후의 강성 혹은 질량을 비교하는 것으로 다음의 식(2)와 같다.

$$[\Delta K]=[K]_a\left([K]_x^{-1}-[K]_a^{-1}\right)[K]_a \tag{2}$$

여기서 하 첨자 a 와 x 는 각각 수학적 모델과 실험으로부터 얻어진 양에 대한 결과를 의미한다. 따라서 식(2)를 이용하여 오차가 발생한 지점의 위치뿐 아니라 그 크기도 예측할 수 있는 장점이 있다. 그러나 본 방법을 적용하기 위해서는 모드의 불완전성을 고려하여야 하고, 해석모델과 실험적 측정위치의 불일치가 발생하므로 이를 해결하기 위한 수단이 필요하다. 이 경우 고차 모드는 대개 무시하는 방법을 쓰고 있으며 측정점의 불일치를 해소하기 위해 실험모드의 확장 혹은 해석모드의 축약을 그 대안으로 제시하고 있다. Gysin 과 Lieven, Ewins[14,15]에 의하면 축약으로 인해 발생하는 오차가 확장으로 인해 발생하는 오차보다 크다고 하였다. Y.S. Park[16]등은 오차 행렬에 가중함수를 도입하였다. 이 가중함수는 각 부재들이 고유 진동수에 미치는 민감도가 다름을 근거로 하였다. 즉 일종의 패턴 가중함수를 이용한 오차 행렬을 도입하여 결함부위의 파악을 보다 신뢰할 수 있도록 하였다.

Kiddy 는 제한조건이 부가된 유연행렬(flexibility matrix)과 강성 행렬을 정의하여 두 행렬의 곱이 단위 행렬이 됨을 이용한 오차행렬을 정의하였다[17]. 이 방법 또한 해석모델에 대한 실험 측정점의 불완전성을 극복하기 위하여 Guyan 축약의 방법을 사용하였으나 오차가 전파되어 재분배 되는 관찰 결과를 얻었다.

위의 방법들과 유사한 방법으로 Gorids 는 모델 동특성 개선의 방법을 변형하여 주파수 응답 함수의 결합을 이용한 방법을 개발하였고 확장에 의한 방법으로 측정점의 과부족 문제를 해결하려는 시도를 하였다[18].

2.3 최적화 방법

수학적 모델을 기반으로 하는 방법 중에서 가장 고전적인 방법의 하나이다. 결함을 가진 구조물의 동특성에 부합하는 새로운 구조물을 구성하고자 하는 의미에서 보면 이 방법은 모델 개선(model updating)의 연장이라고 할 수 있다. 고전적인 최적화의 수순으로 몇 개의 매개변수로 구성되는 목적함수를 정의 하고 매개변수의 구속조건을 부여하여 최적화 문제를 정의한다. 대개 목적 함수는 고유 진동수나 모드 혹은 모드의 변화량 등과 관련 있도록 잡고 있다. 고전적인 방법의 경우 민감도를 구하는 문제가 가장 까다로운 작업이며, 최근에 들어서 기존의 최적화 방법 외에 유전자 알고리즘과 같은 새로운 개념의 방법을 이용하고 있다[24,27,28].

Snayei, Onipede 는 정적인 문제에 대해 강성의 변화를 찾는 기법으로 Guyan 의 축약을 이용하여 오차 행렬을 같이 정의 하고 그 크기를 최소화 하여 결함 지역을 유추하였다[19]. 최적화 작업을 이용한 결함을 찾는 문제의 가장 장애가 되는 부분은 설계변수 혹은 매개변수를 설정하는 데 있다. 모델 개선의 문제와는 다르게 결함이 발생할 수 있는 경우의 수는 매우 많기 때문에 어떤 매개 변수를 선택하는가에 의해 결함을 유발하는 원인을 찾을 수도 있고 그렇지 않을 수도 있기 때문이다. 그러나 단순한 구조물의 경우 매개변수로 잡을 수 있는 경우의 수가 적은 경우는 본 방법을 이용하면 결함의 원인은 물론 그 물리적 의미까지도 명확히 알 수 있다. Snayei 등은 정적인 문제에 대하여 구조물의 단면적과 단면이차 모멘트를 매개변수로 하여 최적화 문제를 정의하였으며 Doebling 등도 역시 단면적을 매개변수로 하였고 모델의 개선 시에 필요로 하는 모드 데이터의 종류에 따라

결과가 달라짐을 고찰한 바 있다[26].

2.4 동특성 할당법(eigenstructure assignment)

통상 제어 분야에서 시스템의 최적화된 제어기 설계나 시스템 안정성을 확보하기 위해 닫힌계(closed loop system)로 인위적인 조정을 하여 원하는 동역학적 시스템을 구성하는 기법을 이용한 방법이다[29,30]. 이러한 개념을 응용하여 구조물의 결함탐지에 사용하고 있으며, 결함이 일어난 후의 구조물의 변경된 동특성을 목표로 하여 기존의 동특성을 갖는 구조물을 제어 법칙을 적용하고, 시스템을 변형하여 결함 부위를 찾아내는 방법이다. 이 방법은 되 먹임 제어(feedback control)의 이론을 바탕으로 한다. 이때 입력 분포를 결정하는 행렬이 중요한 역할을 하며 실험으로 얻어진 결함 후의 고유치와 고유 벡터가 반복적인 계산을 통하여 이론적으로 얻은 값과의 차가 원하는 범위 안에 수렴 할 때까지 구조물 모델의 변형을 통하여 결함을 탐지할 수 있다. 여기서도 물론 측정된 고유벡터의 자유도의 수는 제한적이며 확장에 의한 방법을 통하여 이론적인 값과 비교하고 있다.

또한 모드 영역의 정보를 이용하는 것에 대한 대안으로써 주파수 응답 함수를 직접 대입하여 위의 방법과 유사한 구조를 갖는 방법이 있고, 모드 형상을 구할 필요가 없고 많은 주파수에서의 정보를 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 방법역시 확장에 의한 방법으로 측정하지 못한 주파수 응답 행렬을 예측하여 쓰고 있다.

2.5 고유진동수 변화량의 비교

전술하였듯이 구조물에 결함이 발생하면 모드의 형상과 고유 진동수 또한 변화가 생기며 이를 이용하여 결함을 탐지하는데 쓰고 있다. 결함이 발생하여 구조물에 변화가 생기면 질량의 변화를 무시하고 강성의 변화량 $[\Delta K]$를 다음 식 (3)과 같이 가정 하였을 때

$$[\Delta K]=\sum_{i=1}^{L}[K]_i \tag{3}$$

j 번째의 고유치의 변화량은

$$\Delta\lambda_j=\frac{\{\phi\}_j^T[\Delta K]\{\phi\}_j}{\{\phi\}_j^T[M]\{\phi\}_j}=\frac{\sum_{i=1}^{L}a_i\{\phi\}_j^T[K]_i\{\phi\}_j}{\{\phi\}_j^T[M]\{\phi\}_j} \tag{4}$$

와 같이 표현할 수 있다[35,37]. 따라서 식 (4)를 이용하고 결함이 발생한 부분의 각 요소(element)의 가중치 a_i가 결함이 없는 다른 부분에 상대적으로 작은 사실로부터 다음의 식 (5)와 같은 지수를 정의 할 수 있다.

$$R_{ij}=\frac{\left|R_{dij}-R_{uij}\right|}{R_{uij}} \tag{5}$$

여기서 하 첨자 ij는 i 번째의 고유치 변화량에 대한 j 번째 요소의 영향을 의미한다. 또한 R_{uij}는 결함이 발생하기 전의 i 번째 모드에 대한 j 번째 요소의 영향을 의미하고, R_{dij}는 결함 발생 후의 것을 의미한다. Shi, Law는 이 방법에 대한 수학적 해석과 물리적인 관찰에 대한 논문을 기고하였다. 식 (5)의 정의로부터 결함이 일어난 부위를 알 수 있으며, 결함이 일어난 정도를 파악하기 위해서 m개의 모드와 L개의 파손이 일어날 가능성이 있는 요소를 설정하면 결함의 정도를 파악 할 수 있다. 그러나 이 결과가 의미 있는 해를 갖기 위해서는 고유치의 개수가 결함이 일어날 가능성이 있는 요소의 개수보다 크거나 같아야 한다.

또한 모드 스트레인 에너지를 직접 이용하는 것은 아니나 이 개념을 결함의 발생 가능성에 대해 적용하여 구조물의 각 요소가 결함에 기여하는 정도를 보아 결함의 발견 가부를 정의하는데 사용한 예도 있다[34].

다른 예로, 고유진동수에 대한 민감도 해석을 통해 MAC(mode assurance criterion)의 개념으로부터 다음의 식 (6)을 정의할 수 있다.

$$DLAC(j)=\frac{\left|\langle\{\Delta\lambda\},\{\delta\lambda\}_j\rangle\right|^2}{\langle\{\Delta\lambda\}\{\Delta\lambda\}_j\rangle\langle\{\delta\lambda\}\{\delta\lambda\}_j\rangle} \tag{6}$$

여기서 $\{\Delta\lambda\}$는 결함 전후의 실제 고유치의 차이며, $\{\delta\lambda\}_j$는 j 번째 요소의 영향으로 인한 수학적 모델의 고유치 변화량을 의미한다[39~41]. 따라서 특정요소의 결함으로 인해 고유 진동수가 변하였다면 위의 식으로 정의 되는 지수는 그 요소에 대해 상대적으로 큰 값을 보이게 된다. 이 방법의 전개상 그 역할을 충분히 수행하는 결과를 보기 위해서는 고유치의 변화량이 미소하여 이론적으로 추론한 양과 비슷한 정도를 유지 하여야 한다. 또한 결함이 여러 개인 경우는 각 경우의 수를 분석하여 각각의 기록에 근거하여 비교하여야 하는 어려움이 있다. 따라서 실제적인 적용 보다는 예비적인 시험단계에서 적당하게 쓰여야 할 것으로 보인다.

구조물의 고유진동수 변화를 결함이 발생한 위치와 결함 정도의 함수로 보아 이 함수를 정의하여 결함을 탐지하는 방법도 있다. 고유 진동수의 변화는 많은 연구자들에 의해 결함의 발생 증거로 채택하고 있으며, 결함의 발생위치와 크기의 함수라고 알려져 있으나 그 함수관계를 찾기란 매우 어려운 일이다. Cawley, Adams 는 이 문제를 해결하기 위해 고유진동수의 변화를 다음과 같이 정의하였다[42].

$$\delta\lambda_i = f(\delta K, \vec{r}) \tag{7}$$

이 정의는 또한 Ju, Mimovich 가 단순 보에 발생하는 크랙을 모델하기 위해서도 이용된 바 있다[43]. 즉 고유 진동수의 변화를 결함이 일어난 위치의 정보 $\vec{r}$과 결함의 정도 δK의 함수로 보아 위의 식으로 표현하였으며, $f(0,\vec{r})=0$인 사실로부터 고유 진동수의 변화량은 결함의 위치만의 함수로 결정할 수 있다. 따라서 이 문제는 결함의 정보를 미리 입력하고 그 일어나는 패턴을 일일이 기록하여 실제 문제와 비교하는 형식을 취한다. 일반적으로 패턴을 분류하는 작업은 매우 어렵고 많은 시간이 소비되어야 하는 불편이 있지만 결함의 개념을 이해하는데 좋은 자료가 되므로 다수의 연구자들이 이 내용을 인용하고 있다[44].

이 밖에 통계적 모델을 수립하여 결함을 찾는 방법을 소개하는 내용이 있고, 시간 영역에서 상태 변수를 도입해 결함의 발생여부를 판단하는 방법 등을 연구한 내용이 있다[45~47].

3. Experiment Based Methods

수학적 모델을 기반으로 하는 방법과는 달리 실험으로부터 얻은 정보를 기준으로 결함의 유무와 위치를 파악하기 위한 방법이다. 이러한 방법의 동기는 구조물의 이론적 모델을 만들기가 매우 어렵다는 사실에 있다. 진동학의 한 분야인 모델개선은 물론 이론적 모델과 실 구조물과의 괴리를 극복할 수 있는 실마리가 될 수 있으나 완벽한 모델을 만들기란 사실상 불가능하다고 할 수 있다. 이러한 불합리를 극복하고자 실 구조물에서 발생하는 신호를 분석하여 파손된 부위를 밝혀낼 수 있는 다양한 방법들이 시도되고 있다.

3.1 모드의 변화, 응답의 변화를 이용한 방법

먼저 구조물의 모드에 관점을 두고 해석하는 방법이 있다. 이것은 구조물의 모드를 파손이 일어나기 전과 후로 구분하여, 그 양상을 비교하여 결함이 발생한 위치를 추적하는 방법이다[48~54]. 일반적으로 결함으로 인한 모드의 변화는 매우 둔감하다. 즉 파손 전후의 모드들의 상관 관계는 결함을 파악하기 위한 방법으로는 매우 부 적절하다고 알려져 있다. 반면에 모드의 불연속을 민감하게 감지 할 수 있는 방법으로 모드의 변화량을 이용한 기법을 들 수 있다. 기본적으로 이 방법은 유한 차분법을 이용하여 다음 식(8)을 이용하고

$$\phi_i'' = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{h^2} \tag{8}$$

결함 전후의 모드의 곡률의 차를 비교하여 결함의 위치를 파악하는데 쓰고 있다. 그러나 이 방법은 현재 보(beam)와 같은 단순 구조물에 쓰이고 있으며 위의 식에서도 알 수 있듯이 유한 차분법을 이용한 계산으로 인하여 측정된 각 모드간의 거리에

따라 그 정확도가 좌우된다[48,49].

위의 방법에서 오차를 유발할 수 있는 요인으로 모드를 구하기 위한 곡선 접합(curve fitting)을 들 수 있다. 모드를 구하지 않고 보다 신뢰성을 높일 수 있는 방법으로 주파수 응답 함수의 변화량을 이용한 방법이 있다. 이 방법은 모드를 이용하지 않으므로 보다 정확한 정보를 획득할 수 있으며 주파수 공간에서 작용하므로 많은 양의 정보를 다룰 수 있는 이점이 있다[53].

결함 전후 모드간의 상관관계를 정의하여 결함 부위의 여부만을 확인할 수 있는 방법이 있으며 기본적으로 MAC(Mode Assurance Criterion)의 원리를 이용한다. 여기서 언급한 대개의 방법들은 국부 영역에 따른 모드의 변화량과 관련이 있으며 현재 스트레인을 이용한 방법도 개발이 되는 추세이다.

3.2 신호 해석

구조물의 결함 전후의 신호 성분이 달라지는 점에 착안하여 구조물의 결함 위치를 추정할 수 있는 해석 방법이 고안되었다[55~67]. 그 원리는 결함이 발생한 부위에서는 불연속으로 인해 파동의 전달 또한 간섭을 받는 현상을 이용한 것이다. 따라서 파동의 진행 속도와 파동의 주파수 성분을 동시에 해석할 수 있는 도구가 요구된다. 즉 파동의 어느 성분이 어떤 위치에서 불연속적인 특성을 보이는지를 알기 위해서 시간과 주파수의 정보를 모두 줄 수 있어야 하며, 이러한 도구의 대표적인 것으로는 웨이블렛 변환과 Wigner-Ville 변환을 들 수 있고, 전자의 것을 이용한 연구가 주를 이루고 있다.

일반적인 함수(대개는 시간에 대한 함수) $x(t)$에 대한 웨이블렛 변환은 다음으로 정의 되며

$$W_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \qquad (9)$$

여기서 $\overline{\ \ }$는 웨이블렛 변환 함수의 켤레(conjugate)이다. 웨이블렛 함수는 많이 개발이 되어 있는 상태이며 웨이블렛의 종류에 따라서 연속의 정도(smoothness)나 직교성과 같은 특성이 달라진다. 또한 b는 시간축의 이동을 의미하고 a는 사건이 발생하는 시간의 빠르기를 뜻한다. 즉 a가 클수록 저주파 성분이 지배적이고 작을수록 고주파 성분이 지배적이 된다. 이러한 변환을 거쳐 a, b와 W의 관계를 3차원 상에서 분석하거나 2차원의 궤적상에서 분석하면 결함이 발생하는 위치를 추정할 수 있다.

파워 스펙트럼의 분석 방법과 유사한 Wigner-Ville 변환은 일반적인 시간 함수 $x(t)$에 대해 식 (10)과 같이 정의 된다.

$$W_x(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{x\left(t-\frac{\tau}{2}\right)} x\left(\tau+\frac{\tau}{2}\right) e^{-2\pi f\tau} d\tau \qquad (10)$$

이 방법도 웨이블렛과 동일한 방법으로 신호를 분석하여 결함의 유무를 알 수 있으나 일반적으로 간섭에 대해 매우 취약하여, 신호간의 간섭이 심한 경우는 원하는 만큼의 성능을 볼 수 없다는 단점이 있다[65~66].

일반적으로 진동신호 해석에 의한 방법은 다른 방법에 비해 매우 효과적이나 간단한 구조물의 경우를 제외 하고 일반적인 구조물에 대한 연구는 현재 매우 빈약한 실정이다.

4.결론

지금까지 구조물의 결함탐지를 위해 진동의 개념을 도입한 방법에 대해 소개를 하였다. 진동을 이용한 방법은 기존의 방법에 비해 상대적으로 적용이 용이하나, 현재까지의 연구 결과는 위에서 언급한 많은 문제로 인하여 여러 가지 제한적인 상황이 있음을 알 수 있었다.

앞으로 전개될 연구의 주제는 이러한 단점들을 극복하여 보다 실용적이고 적용 가능한 방법들에 대한 것이 주를 이룰 것이다. 구조물의 대형화와 복잡화가 진행 되어 질수록 진동공학을 하는 연구자들은 여기에 관한 연구에 노력을 해야 할 것으

로 사료된다.

참고문헌

참고 문헌이 많은 관계로 다음의 홈페이지에 참고 문헌 자료를 올립니다.
http://santafe.kaist.ac.kr