

EMD와 블라인드 디컨볼루션을 이용한 초음파 비파괴 평가의 결함 검출 기술 개발

남명우*, 이영석**

요약

본 논문에서는 EMD(Empirical Mode Decomposition)를 이용하여 초음파 신호로부터 IMF(Intrinsic Mode Functions) 신호들을 분류해낸 후 블라인드 디컨볼루션을 이용하여 시편에 존재하는 결함의 정확한 위치를 검출하는 방법을 제안하였다. 먼저 EMD를 이용해 얻어진 IMF 신호들 중 가장 큰 에너지를 가지는 신호를 선택하여 blind convolution을 적용하였으며, 여기서 얻어진 역 필터 함수를 이용하여 시간 축상에 임펄스 신호를 생성하였다. 제안한 방법의 성능 평가를 위하여 결함이 가공된 시편을 사용하여 실험을 수행하였으며, 저역통과 필터와 RMS를 이용한 결함 위치 검출 방법과 비교하였다. 실험 결과 제안한 방법이 기존 방법보다 더 정확한 결함 위치 검출이 가능함을 확인 할 수 있었다.

Development of defect detection technique for ultrasonic nondestructive evaluation using blind deconvolution and EMD

MyungWoo Nam*, Young-Seok Lee**

ABSTRACT

In this paper, we proposed new method using empirical mode decomposition and blind deconvolution for defect detection technique of ultrasonic nondestructive evaluation. At first, the maximum energy signal among IMFs obtained from EMD was selected and used by blind deconvolution method. Next, impulse signal was made by inverse filter from using blind deconvolution method in time domain. In order to evaluate the proposed method, the conventional methods were compared using the specimen with artificial defects. From the experiment results, the proposed method can be confirmed that it can detect the defect location more accurate than conventional methods.

Key Words : EMD, blind deconvolution, NDT, IMF, HHT

* 해전대학교 전자캐드과(✉mwnam@hj.ac.kr)

** 청운대학교 전자공학과

· 제1저자(First Author) : 남명우 · 교신저자(Correspondent Author) : 남명우

· 접수일(2011년 3월 9일), 수정일(1차 : 2011년 4월 28일), 게재확정일(2011년 5월 3일)

I. 서론

현재 국내에서 가동되고 있는 발전 설비들 가운데는 60~70년대에 건설되어 수명상 한 주기를 넘기게 된 것과 노후 된 설비의 폐기, 보수 또는 대체를 결정할 시기가 된 것, 소재의 신뢰성 또는 설계, 시공, 설치 및 설계 기술이 축적되지 못한 상태에서 제작 설치된 설비들이 많이 있다. 이러한 장치들이 가동 중 파손되면 장치 자체의 손실은 물론 생산 중단 및 급작스런 작동 중단에 의한 장치 수명의 감소, 사후 처리비용의 증가, 인명 피해, 환경오염과 같은 직접적인 피해가 발생하게 된다. 또한 발전 사고로 인한 공장의 생산 중단은 공장의 생산품을 원료로 사용하는 타 공장까지 연쇄적인 조업을 중단케 하는 등 파급 효과가 엄청나다.

이러한 관점에서 비파괴 검사(Non-Destructive Testing; NDT)는 발전 설비의 안전성, 잔여 수명예측과 같은 설비의 안전에 영향을 미치는 요소들을 평가할 수 있는 기술로서 각광을 받고 있다. 비파괴 검사란 재료나 제품의 원형과 기능에 변화를 주지 않으면서 결함을 찾아내어 재료나 제품을 평가하는 검사방법을 의미한다. 비파괴 검사는 발전 설비 가동 시에 안전확보, 기계, 기구 및 설비의 수명 평가 등 여러 분야에서 다목적으로 사용되고 있다.

비파괴 검사에서 사용되는 방법은 발전설비 즉, 검사하려는 매질 내부를 침투할 수 있는 에너지원의 형태에 따라 분류할 수 있다. 예를 들어 초음파(ultrasound), 감마선(γ -ray), X-선, 누설 전류(leakage current), 누설 자장(leakage magnetic field) 등을 이용한 비파괴 평가 방법 등이 현장에서 사용되고 있다. 특히 초음파 신호를 이용한 비파괴 검사 방법은 다른 에너지원을 갖는 비파괴 검사 방법에 비하여 경제적이고 방사능 피폭에 대한 염려가 없으며 검사 장치 또한 비교적 간단하기 때문에 발전설비의 비파괴 평가에 널리 사용되고 있다.

최근의 비파괴 검사에 대한 개념도 정보화 시대에

접어들어 급속도로 바뀌는 경향이 있다. 검사로 얻어진 정보와 신호는 통신 매체의 발달에 힘입어 직접 측정을 수행하지 않고도 분석이 가능하며 검사 기술과 방법은 이제 기존의 방법을 탈피하여 새로운 분석 및 측정 방법들이 제시되고 있다. 이와 같은 변화는 새로운 결함 검출 기술 개발, 가동 중 검사에 있어 점차 저비용, 고효율의 정책이 추구하고 있으며 초음파 비파괴 평가 또한 이러한 변화에 편승하여 새로운 분석 기법들이 선보이고 있다.

본 연구에서는 자동화된 초음파 탐상 기술을 개발하기 위하여 시편으로부터 수집된 초음파 신호에 대하여 EMD(empirical mode decomposition)을 수행하고 초음파 신호의 에너지가 집중된 대역에 대하여 블라인드 디컨볼루션(blind deconvolution)을 수행하여 결함이 위치한 부분에서 피크값이 검출될 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘의 성능 평가를 위하여 현재 사용되는 있는 저역통과 필터와 RMS(root mean square) 방법과 비교하였으며, 실험결과 제안한 방법이 더 정확한 결함의 위치를 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

II. 이론적 배경 및 실험장치의 구성

2.1 실험장치의 구성 및 데이터 획득

실험을 위하여 본 연구에서는 그림 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 시편은 가로 600mm, 세로 150mm의 스테인리스 스틸재질로 결함을 가정하기 위한 구멍(hole)과 노치 등 다양한 종류의 결함으로부터 데이터를 획득하기 위하여 총 9개의 결함으로 구성되었다. 각각 폭 10mm, 깊이는 20mm, 40mm, 50mm의 값을 갖는 3종류의 노치(notch)를 가공하였다.

또한 결함이 파이프라인의 바닥에서 형성되었다는 가정 하에 지름이 5mm이고 깊이가 20mm, 40mm, 50mm인

FBH(flat bottom hole)를 형성하였고, 파이프라인의 중간에 형성되는 과정을 고려하여 깊이방향으로 각각 20mm, 40mm, 50mm고 지름이 5mm인 FBH를 형성하였다. 탐촉자는 2.25MHz 펄스 에코 방식을 사용하였고, 펄서/리시버는 Panametrics사의 500PR을 사용하였다. 준비된 시편으로부터 데이터는 그림 1과 같은 구성된 실험장치로부터 획득되었다.

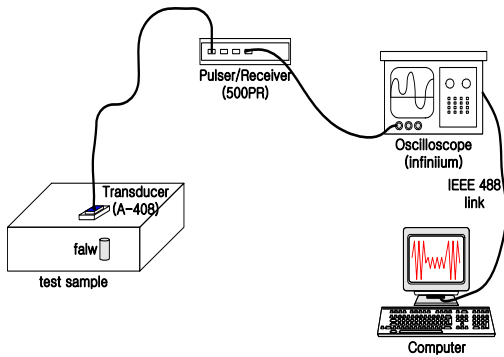


그림 1. 실험장치의 블럭도
Fig. 1 Block diagram of experimental device

그림 2는 시편의 결함으로 가정된 부분에서 획득한 A-scan 초음파 데이터로서 탐촉자와 시편 표면의 접촉면에서 반사된 초음파 신호(main bang)와 시편의 바닥부분에서 반사된 초음파 신호(back echo)사이 에 결함이 존재하는 것으로 가정할 수 있다.

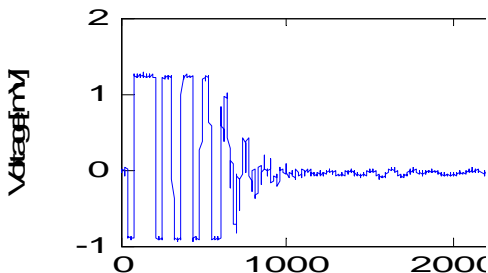


그림 2. 시편에서 수집한 A-scan 데이터
Fig. 2 A-scan data of specimen

하지만 관측한 신호는 스펙클 잡음에 의해 결함의 존재 유무를 확인할 수 없는 모호성이 있다. 탐촉자와 시편의 접촉면에서 반사된 초음파 신호 및 시편의 바닥 면에서 반사된 초음파 신호에 의해 결함에서 반사된 초음파 신호를 확인할 수 없는 단점을 극복하기 위하여, 구현된 알고리즘을 적용하기 전에 '0' 을 삽입하여 결함으로부터 반사된 초음파 신호만을 분석 대상으로 하였다.

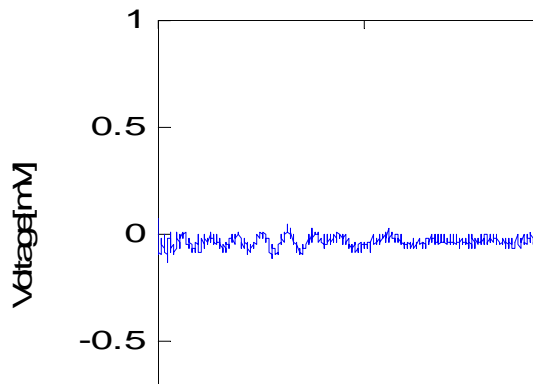


그림 3. main bang과 back echo를 제거한 데이터
Fig. 3 Data after eliminating main bang & back echo

2.2 Empirical mode decomposition

EMD를 이용한 시편면 신호의 분해 기법은 최초에 Huang 등[1]에 의하여 개발된 신호 처리 알고리즘이다. 이는 시편면 신호를 시간-주파수 평면으로 분해하여 시편면 신호의 시간-주파수 분포 및 지역적 특성을 관측할 수 있도록 하는 방법으로 비선형 또는 시변 신호의 분석에 응용되었다. EMD는 일반적으로 HHT (Hilbert-Huang transform)으로 알려져 있으며, 최근 들어 1차원 신호에 대한 변환뿐만 아니라 2차원 신호에 대한 변환 방식이 2차원 EMD로 개발되어 영상에 적용되기 시작하였다[2,3].

EMD는 다중 주파수 성분으로 구성된 신호를 단일 주파수 성분 신호인 IMF들로 분류해 내는 것이다. IMF의 가장 두드러진 특징은 EMD 변환에서의 경험

적 반복 과정(empirical iteration process)을 갖는다는 것이다. IMF는 각 주기에서 영 교차하고, 국부적으로 다른 복잡한 파형을 포함하지 않은 주파수 성분을 가지는 파형을 의미한다. IMF로 분해된 성분들은 식 (1)과 같이 IMF 성분들과 나머지 잔여신호의 합으로 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

그림 4는 EMD를 이용해 초음파 신호를 IMF로 분해한 것을 보인 것이다. 그림 4에서 점선부분에 포함된 신호는 시편에서 얻어진 A-scan 데이터이다. 본 연구에서는 EMD를 이용해 얻어진 IMF중 초음파 신호의 에너지가 집중된 대역에 대하여 블라인드 디컨벌루션을 수행하여 초음파 신호로부터 결함의 위치를 추정하였다.

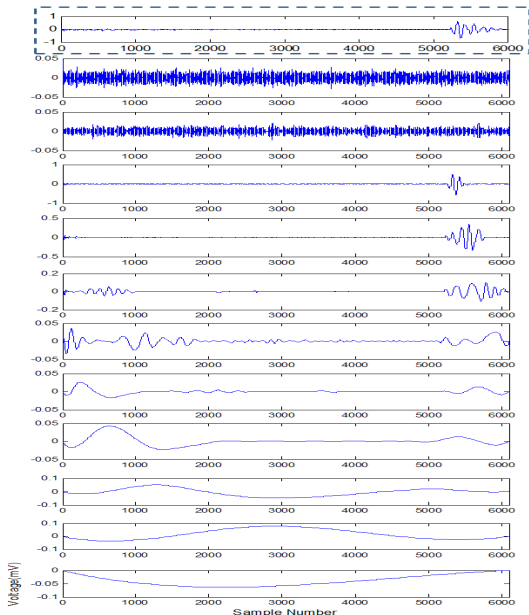


그림 4. EMD를 이용해 얻어진 IMF 신호들
Fig. 4 IMF signals from EMD

2.3 블라인드 디컨벌루션(blind deconvolution)

일반적인 선형 시불변 시스템(linear time-invariant system)에서 출력 $y(t)$ 와 입력 $x(t)$ 간에는 시스템의 임펄스 응답 $h(t)$ 가 존재하며 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

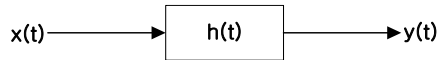


그림 5. 선형 시불변 시스템
Fig. 5 Linear time-invariant system

초음파 실험 장치를 선형시스템으로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = x(n) * h(n) + r(n) \quad (2)$$

위 식에서 $x(n)$ 은 초음파 펄스, $h(n)$ 은 초음파가 입력되는 시스템, $r(n)$ 은 잡음이며 *는 컨벌루션 연산을 의미한다.

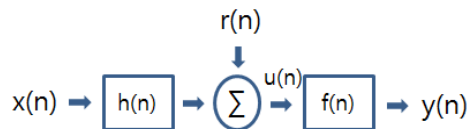


그림 6. 디컨벌루션 모델
Fig. 6 Model of deconvolution

식 (2)에서 $x(n)$ 에 대한 추정치를 구함으로써 시스템의 임펄스 응답 $h(n)$ 을 구할 수 있다. $h(n)$ 을 구하기 위한 방법으로는 그림 6과 같이 출력 $y(n)$ 을 갖는 역 필터 $f(n)$ 을 만들어 출력신호 $y(n)$ 이 입력신호 $x(n)$ 을 추정할 수 있도록 설계하는 것이다. 만약 역 필터 $f(n)$ 이 최적으로 설계 되었다면 식 (3)과 같이 표현 될 수 있다.

$$h(n) * f(n) = \delta(n - l_m)$$

(3)

위 식에서 l_m 은 임펄스 함수의 시간지연을 의미한다. 임펄스 응답 $h(n)$ 은 실제 적용에서는 알려지지 않은 경우가 많고 시간에 따라 변하는 특성 때문에 특정 기준 신호를 이용하여 구하는 방법은 적합하지 않다. 따라서 임펄스 응답에 대한 사전 지식이 전혀 없는 상태에서 디컨볼루션을 수행하여 $f(n)$ 을 구하는 방법을 블라인드 디컨볼루션이라고 한다[4,5].

초음파 비파괴 평가에서 관심을 갖는 부분은 결함의 존재 여부와 함께 결함의 z 좌표, 즉 결함의 깊이에 관한 부분이다. 본 연구에서는 결함의 깊이 방향의 분해능 향상을 위하여 블라인드 디컨볼루션을 이용하여 결함의 깊이를 검출하였다. 사용한 디컨볼루션 기술은 Wiggins에 의하여 제안된 **Minimum Entropy Deconvolution** 기법으로서 결함으로부터 반사된 초음파 신호만을 이용하여 역 필터를 추정하는 방식이다[6].

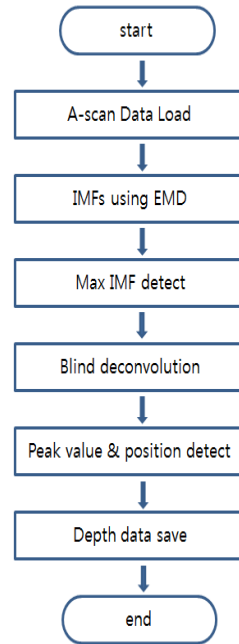


그림 7. 블라인드 디컨볼루션 흐름도
Fig. 7 Flowchart of blind deconvolution

그림 7은 블라인드 디컨볼루션을 이용하여 결함의 깊이정보를 획득하는 흐름도를 나타내고 있으며, 그림 8은 A-scan 초음파 데이터에서 얻어진 IMF 신호 중 가장 큰 에너지를 가지는 신호에 대한 블라인드 디컨볼루션 적용 예이다. 점선 부분에 임펄스가 발생한 것을 볼 수 있다.

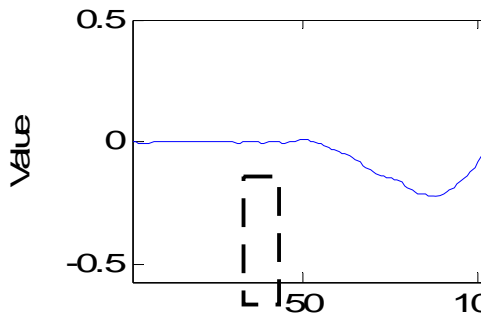


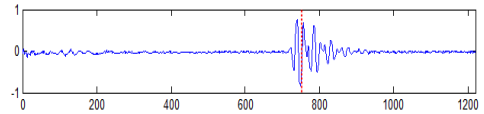
그림 8. IMF신호에 블라인드 디컨벌루션 적용 예
Fig. 8 Applying the blind deconvolution to IMF signal

III. 실험 결과

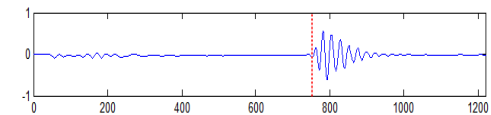
제안한 알고리즘의 성능 평가를 위하여 지름이 5mm, 깊이는 20mm, 40mm, 50mm의 값을 갖는 3종류의 FBH를 사용하였다. 실험은 먼저 A-scan 초음파 데이터를 획득한 후, 이를 이용하여 가장 큰 에너지를 갖는 IMF 신호를 EMD를 이용하여 구하였다. 다음으로 얻어진 IMF 신호 중 임펄스 응답에 해당하는 부분만을 이용하여 블라인드 디컨벌루션을 적용하여 역 필터 함수를 구했다. 그리고 얻어진 역 필터를 IMF 신호에 적용하여 시간 축상에 임펄스를 발생시켰다. 그림 9는 A-scan 데이터에 저역통과 필터, RMS 그리고 제안한 알고리즘을 사용하였을 때를 각각 비교한 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 제안한 알고리즘이 다른 방법에 비해 더 정확한 크랙 위치를 추정할 수 있었다.

그림 9 (b) 저역통과 필터의 경우 잡음이 제거된 에너지 신호만이 남게 되며, 얻어진 신호의 시작은 크랙의 위치 추정에 적합하지 않다. 또한 그림 9 (c) RMS를 사용할 때는 저역통과 보다는 향상된 결과를 얻을 수 있으나 초음파 반사 신호가 가지는 여러 가지 특성들과 잡음에 의해 정확한 값을 얻는데 한계가 있다. 본

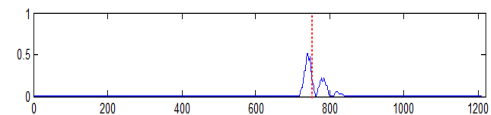
논문에서 제안한 방법은 얻어진 신호를 분해한 후, 크랙의 위치를 추정함으로써 잡음 및 초음파 전송 특성에서 나타날 수 있는 많은 문제점을 해결 할 수 있었다.



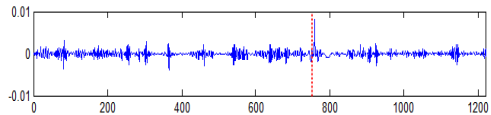
(a) 시간축에 넓게 퍼진 A-scan 초음파 신호



(b) 저역통과 필터 처리



(c) RMS 처리



(d) 디컨벌루션 처리

그림 9. 분해능 향상을 위해 사용된 기술의 비교
Fig. 9 Comparison of techniques for resolution enhancement

참고문헌

- [1] Norden E. Huang, Zheng Shen, and Steven R. Long, "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis", Proceedings of the Royal Society of London, A.8, 454, pp. 903-995, 1998.

- [2] Leslie M. Novak, "A Comparison of 1-D and 2-D algorithms for radar target classification", Systems Engineering, IEEE International Conference, pp. 6-12, 1991.
- [3] Jian Kang, Jie Zhang, Pingjian Song, and Junmin Meng, "The Application of Two-Dimensional EMD to Extracting Internal Waves in SAR Images", Computer Science and Software Engineering, vol. 1, pp953 - 956 , 2008
- [4] Uvais Qidwai and C. H. Chen, "Blind image deconvolution for ultrasonic C-scans", Review of Process in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 20, pp. 579-586, 2001.
- [5] S. Gautier, B. Lavayssiere, and G. Le Besnerais, "Improving the resolution on ultrasonic data through deconvolution", Review of Process in Quantitative Evaluation, pp. 699-702, 2000.
- [6] 고광천, "초음파 비파괴 평가의 3차원 영상화 기술에 관한 연구" 청운대학교 정보산업대학원 석사학위논문. pp34-39, 2004

감사의 글

본 연구는 해전대학 교내연구과제에 의해 수행되었습니다.

저자소개

남명우(MyungWoo Nam)



1992년 2월 : 서울시립대학교 제어계
측공학과(공학사)

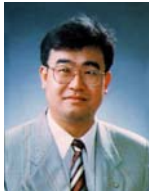
1994년 2월 : 서울시립대학교 대학원
전자공학과(공학석사)

2001년 8월 : 서울시립대학교 대학원
전자공학과(공학박사)

2003년 3월 ~ 현재 혜전대학 전자캐드과 교수

※ 관심분야: 신호처리, 회로설계, 마이크로프로세서

이영석(Young-Seock Lee)



1993년 2월 : 서울시립대학교 전자
공학과(공학사)

1995년 2월 : 서울시립대학교 대학
원 전자공학과(공학석사)

1998년 8월 : 서울시립대학교 대학
원 전자공학과(공학박사)

1998년 3월 ~ 현재 청운대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야: 임베디드 시스템, SoC, 의용전자시스템