

A-Scan 초음파 신호의 시간분해능 향상을 위한 웨이브렛 해석 기반 디컨벌루션 기법

하 읍* · 장경영**

Wavelet Transform Based Deconvolution for Improvement of Time-Resolution of A-Scan Ultrasonic Signal

Job Ha, kyung-Young Jhang

Key Words : A-Scan(A-스캔), time-resolution(시간분해능), wavelet transform(웨이브렛 변환), deconvolution(디컨벌루션)

Abstract

Ultrasonic pulse echo method comes to be difficult to apply to the multi-layered structure with very thin layer, because the echoes from the top and the bottom of the layer are overlapped. Conventionally method, deconvolution technique has been used for the decomposition of overlapped UT signals, however it has disabilities when the waveform of the transmitted signal is distorted according to the propagation. In this paper, the wavelet transform based deconvolution (WTBD) technique is proposed as a new signal processing method that can decompose the overlapped echo signals in A-Scan signal with superior performances compared to the conventional deconvolution technique. Performances of the proposed method are shown by through computer simulations using model signal with noise and are demonstrated by through experiments for the fabricated acryl rod with a thin steel plate bonded to it.

1. 서 론

초음파 펄스 에코법은 높은 감도와 취급의 용이함으로 인해 광범위하게 응용되고 있다. 특히 A-Scan은 가장 간단하고 정확하게 측정할 수 있다 는 점에서 경제적인 검사법이라 할 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 이 방법은 검사체가 다층구조이고 검사면이 과장에 비해 두께가 얇은 경우 그 계면 상하의 반사 에코가 중첩되어 반사파와 사이의 시간차 측정과 계면 상태의 평가에 오류를 발생시킨다.

중첩과 관련하여 펄스 에코 신호의 깊이 방향 분해능을 향상시키기 위한 방법으로 기존의 디컨벌루션(deconvolution) 기법이 있다.⁽²⁾ 그러나 이 방법은 반사파의 과정이 송신파와 유사하다는 가정을 전제로 하고 있어 초음파의 전파과정에서 과정의 변화가 심하지 않은 경우에만 효과적으로 적용

할 수 있다. 따라서 저주파수를 사용하여 검사하는 경우 검사체의 재질과 전파 깊이에 따라 과정의 변형과 왜곡이 심해 이 기법의 적용이 곤란하다. 저자들은 이를 해결하기 위한 새로운 신호처리 기법인 웨이브렛 변환기반 디컨벌루션 기법(WTBD: Wavelet Transform Based Deconvolution)을 제안했고, 초음파 주사 현미경(SAM)을 이용한 얇은 반도체의 계면 검사에 적용하여 좋은 결과를 얻은 바 있다.⁽³⁾

그러나 이 연구는 15MHz의 고주파를 이용한 경우이었다. 본 논문에서는 SAM과 같은 고주파수를 사용하지 않는 범용의 펄스 에코 측정장치에서 WTBD 기법의 적용 가능성을 검증하고자 하였다. 이를 위하여 아크릴 봉재에 1.5mm의 얇은 강판을 접착시킨 시험편을 준비하였으며 5MHz의 범용 펄스 에코 장치로 얻은 A-Scan 신호에 WTBD 기법을 적용하였다. 또한 잡음에 의한 영향을 시뮬레이션에서 비도 비중있게 다루었다.

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한양대학교 기계공학부

2. 알고리즘

2.1 디컨벌루션 기법

초음파 펄스 에코법에서 송수신 신호를 각각 시간 t 의 함수인 $S_T(t)$, $S_R(t)$ 로 표시하면, 수신신호는 다음과 같은 컨벌루션 적분의 형태로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$S_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x) S_T\left(\frac{t-2x}{v}\right) dx \quad (1)$$

즉, 수신신호는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 탐촉자로부터 송출된 초음파가 속도 v 로 전파해서 x 의 위치에 있는 반사체에서 반사되어 돌아오는 성분이 x 축을 따라 누적된 결과를 나타낸다. 여기서 $\rho(x)$ 는 반사체의 반사계수로써 송신점으로부터의 거리의 함수이다. ρ 의 크기는 계면 상태 판정의 파라미터로 결합이 있는 계면에서의 값이 그렇지 않은 계면에서의 값보다 매우 크게 나타난다. ρ 의 분포는 송수신 신호의 푸리에 변환을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 $2x/v = t'$ 으로 치환하고 식(1)을 푸리에 변환하면 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} S_R^-(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho'(t') S_T^{(t-t')} e^{-j\omega t'} dt' \\ &= \rho^-(\omega) S_T^-(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ρ' , S_T' 은 각각 ρ , S_T 를 t' 에 대한 함수로 표현한 것이다. S_R^- , S_T^- , ρ^- 은 각각 S_R , S_T , ρ 의 푸리에 변환형태이다. 따라서 반사계수의 푸리에 변환은 다음과 같이 구할 수 있다

$$\rho^-(\omega) = \frac{S_R^-(\omega)}{S_T^-(\omega)} \quad (3)$$

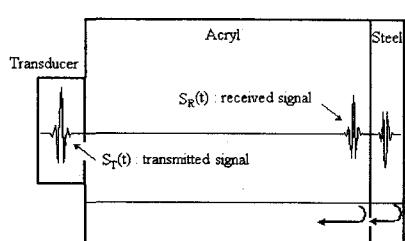


Fig. 1 Transmitted and received echo signals in testing

최종적으로 $\rho'(t')$ 은 $\rho^-(\omega)$ 의 역푸리에 변환의 의해 구해진다. 이와 같은 방법으로 반사계수의 분포를 구하는 것을 디컨벌루션이라 부르며, 반사체의 위치 및 시간에 대한 정보를 엘타함수적으로 나타내기 때문에 중첩된 신호라 하더라도 비교적 정확하게 반사신호를 구분해 낼 수 있다.

Fig. 2는 디컨볼루션 기법의 개념을 나타낸다. 여기서 x_1 은 송신신호로 보았고 연속된 두 저명 반사 에코인 x_2 와 x_3 의 중첩 성분인 $x_2 + x_3$ 를 수신 신호로 보았다. 이 신호를 디컨볼루션 처리하면 반사계수의 분포가 그림에서와 같이 임펄스로 얻어지고, 이 반사계수의 위치, 진폭 및 위상으로부터 계면의 위치와 결합의 유무를 평가할 수 있다.

그러나 이 기법은 앞서 언급하였듯이 송신파형과 수신파형이 동일하다는 것을 전제로 하기 때문에 에코의 주파수 성분과 모양이 송신파의 그것과 차이가 큰 경우에는 적용이 곤란하게 된다.

2.2 웨이브렛 변환 기법

함수 $f(t)$ 의 웨이브렛 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (4)$$

웨이블렛 변환은 시간정보와 주파수정보를 동시에 분석할 수 있는 효과적인 신호처리 도구로 최근 다양한 응용이 시도되고 있다.

여기서 F 는 함수 f 의 웨이브렛 변환이며, $\Psi_{a,b}$ 는 기본 웨이브렛으로서 다음과 같이 주어지며 *는 위상공액을 나타낸다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0 \quad (5)$$

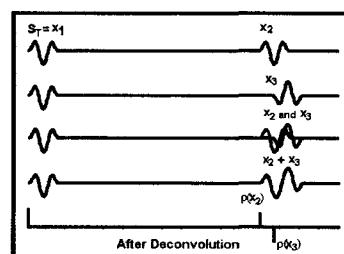


Fig. 2 Separation of overlapped signal using deconvolution technique

여기서 a 는 확대 파라미터(dilation), b 는 이동 파라미터(translation)를 나타내며, 이 때 $\Psi(t)$ 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

이런 조건을 만족하는 기본 웨이브렛에는 여러 종류가 있는데 본 연구에서는 초음파 펄스 파형과 유사한 파형을 이용하였다.⁽⁵⁾

웨이브렛 변환은 시간정보와 주파수정보를 동시에 관측할 수 있을 뿐만 아니라 기본 웨이브렛과 유사한 성분을 주파수 대역별로 선별하여 분리해내는 서브밴드필터 (subband filter)의 기능을 가지고 있다.⁽⁶⁾ 이것은 이산웨이브렛 변환 (discrete wavelet transform)에 의해 가능하며, 다중해상도 분석(multiresolution analysis)에 대응되는 기능이다.⁽⁷⁾ 즉, 원신호(origianl signal)를 신호의 거시적인 거동을 보이는 A 성분(Approximation, 저주파 대역)과 미시적인 거동인 D 성분(Detail, 고주파 대역)으로 분해하고, 이 저주파성분을 다시 서브밴드필터링해 나가게 된다. 본 연구에서는 원신호로부터 고주파 성분을 잡음으로 간주해 필터링시키고, 여기서 얻어진 특정 레벨(level)의 저주파 신호를 선택함으로써 어느 정도 왜곡된 파형이라 할지라도 송신파를 적절히 추출해 내어 신호처리에 사용하였다.

2.3 웨이브렛 변환 기반 디컨벌루션(WTBD)

계면에서의 에코 신호는 전파거리와 매질에 따라서 주파수 성분이 변화하고, 또 초점 영역과 비초점 영역에서 에코의 파형이 달라지므로 앞서 기술한 디컨볼루션 기법을 효과적으로 적용할 수 없다. 그러나 에코의 기본형태는 크게 달라지지 않으므로 이 형태를 기본 웨이브렛으로하여 웨이브렛 변환하면 송수신 신호를 주파수대역별 웨이브렛으로 분리할 수 있다. 이렇게 분리된 신호 안에 있는 에코 신호들은 모두 유사한 파형을 가지므로 적절한 레벨의 A 성분을 선택하여 디컨볼루션 기법을 적용하면 각 에코의 재현이 가능해 질 것이다. 이런 방법을 WTBD 기법으로 명명했다.⁽⁸⁾

3. 모형신호 시뮬레이션

3.1 모형신호

WTBD 기법의 유용성을 검증하기 위하여 식(7)과 같은 모형신호를 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

$$S(t) = \alpha \sin\{\omega(t-\tau)\} \sin\left(\frac{\omega(t-\tau)}{2n}\right) \quad \tau < t < \tau + nT \quad (7)$$

$$S(t) = 0, \quad t < \tau, t > \tau + nT$$

여기서 진폭 α 와 각주파수 ω 를 변화시킴으로써 초음파 신호의 감쇠에 따른 진폭과 주파수 성분을 변화시킨다. 또 실제의 경우를 고려하여 에코 파형의 변화와 함께 잡음을 포함시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우에 단순 필터방식이라 불리우는 식(3)은 분모가 0에 가까워지면 매우 불안정하게 되므로 이를 방지하기 위해 다음과 식과 같은 위너필터(wiener filter)를 이용하였다.⁽⁹⁾

$$W(\omega) = \frac{S_T^{-1*}(\omega)}{|S_T^{-1}(\omega)|^2 + N(\omega)} = \frac{S_T^{-1*}(\omega)}{|S_T^{-1}(\omega)|^2 + N} \quad (8)$$

여기서 $N(\omega)$ 는 잡음의 스펙트럼을 나타내는데 대부분의 초음파 신호에서 잡음은 백색 잡음에 유사하므로 이를 주파수에 무관한 상수 N 으로 가정하는 유사 위너 필터를 이용하였다.

시뮬레이션을 위해 신호의 진폭 x_1, x_2, x_3 를 각각 1.0, 0.8, 0.6으로 하였고 주파수는 기본주파수를 5MHz로 하여 파형의 변화를 주었다.

본 연구에서는 최적의 반사계수의 분포를 얻어냄으로써 시간분해능 향상에 유용하도록 하기 위해 S/N 비, 위너 필터상수 그리고 잡음 레벨의 세 가지 파라미터에 초점을 맞추어 수행하였다.

3.2 S/N 비, 위너 필터상수 그리고 잡음레벨이 일정한 값을 가질 경우

Fig. 3은 앞서 기술한 세 가지 관심 파라미터를 동일하게 한 상태에서 시뮬레이션을 수행하여 모형의 분리신호와 중첩신호에 대한 웨이브렛 적용 전후의 디컨볼루션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 잡음이 부가된 두 경우 모두에 대해서 웨이브렛 적용 후의 결과가 원래 신호의 위치, 시간 정보 및 진폭까지를 잘 재현함을 알 수 있다.

제안된 기법은 원신호를 연속적인 서브밴드 필터링을 통해 잡음을 저감시키고 원신호의 성질을 최대한 보존하고 있는 A 성분을 찾아서 시뮬레이션 했을 때 가장 효과적이라 하겠다.

Fig. 4는 중첩된 신호에 대해서 S/N 비가 동일한 경우에 각 A 성분 레벨의 WTBD 적용결과를 비교하여 나타낸 것이다.

여기서는 레벨 4에서 가장 좋은 결과를 얻었다. 하지만 이것을 최적의 필터링 레벨로 단정 지을 수는 없다. 일반적인 초음파 신호의 잡음 포함정

도를 고려할 때 2~4 레벨 정도의 A 성분에 대해 제안된 방법을 적용하면 유효한 결과를 얻을 수 있을 것으로 본다.

3.3 필터상수와 잡음레벨에 변화가 있을 경우

3.3.1 필터상수의 영향에 대한 분석

필터상수에 따른 WTBD 기법의 적용결과를 비교하였다. 실제적인 경우에 가깝도록 S/N=2, 잡음레벨 N=0.2로 주고, 필터상수를 0.01, 0.1, 1, 10으로 변화시켜 시뮬레이션 하였다. 단, 이것은 레벨 4에 대한 값이다.

Fig. 5는 필터상수에 따른 반사계수의 분포와 크기를 비교하기 위해 나타낸 것이다. 필터상수가 0.01과 0.1인 경우에는 반사계수가 임펄스형태로서 시간정보 및 원신호의 진폭까지를 비교적 잘 복원해 주었다. 그러나 10 이상이 되면 반사계수의 크기가 현저히 줄어들고 둔한 모양을 보인다. 따라서 제안된 방법은 필터상수를 0.1 이하로 했을 때 보다 유효함을 알 수 있다.

3.3.2 S/N 비의 영향에 대한 분석

제안된 기법은 원신호에 포함된 잡음을 적절히 필터링하여 얻어진 특정 레벨의 A 성분을 사용하는데 이런 잡음 포함 정도에 따라 WTBD 기법은 적용한계를 갖게 된다. 다만 초음파 신호의 경우에는 S/N 비가 1 이하인 경우에 대해서는 고려할 필요가 없다고 보고, 모형신호의 S/N 비가 40, 20, 10, 5, 4, 2, 1.3인 경우에 각각의 잡음레벨을 0.01,

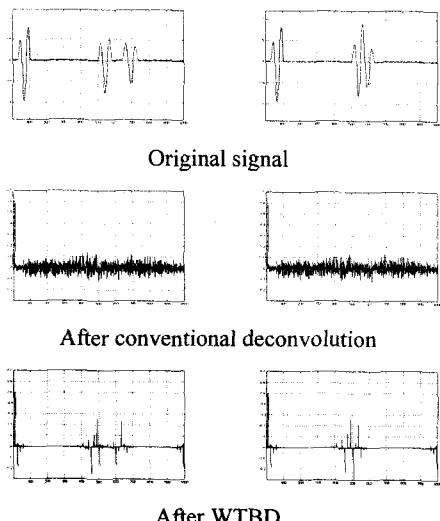


Fig. 3 Simulation results of deconvolution and WTBD

0.02, 0.04, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3으로 하여 시뮬레이션하였다.

Fig.6의 (a)와 (b)는 각각 S/N 비가 다를 경우에 기존의 디컨벌루션과 WTBD 기법을 적용했을 때 원신호에 대한 시간분해능을 판별하기 위한 TOF (time of flight) 오차와 반사계수의 진폭오차를 나타낸 것이다. 여기서 DX는 반사계면에서의 디컨벌

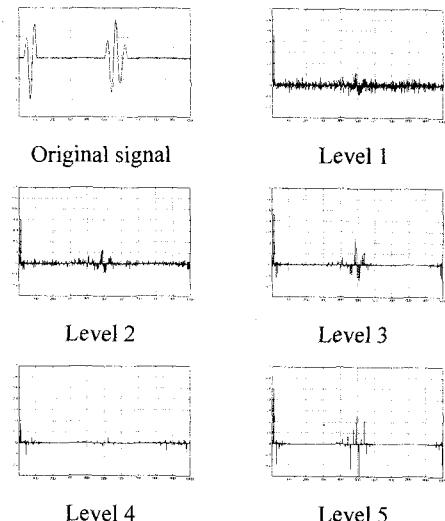


Fig. 4 WTBD results on each approximation level

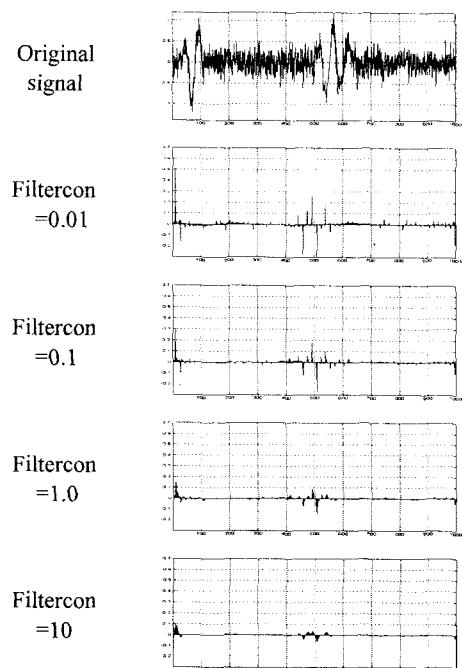


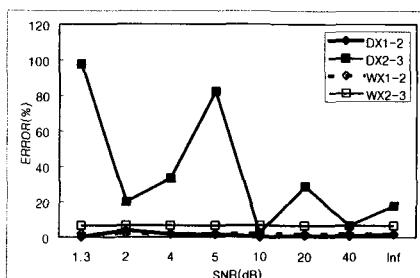
Fig. 5 Reflect coefficient's distribution and amplitude by wiener filter constant change

루션 적용값을 나타내고 WX 는 WTBD 적용 결과를 표시한다. 제안된 기법은 기존의 디컨벌루션 기법과 비교해 오차가 상당히 작았고 편차도 일정함을 알 수 있었다.

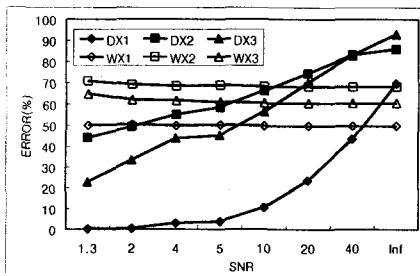
S/N 비가 달라지면 원신호가 잡음으로 인해 송신파형의 변질을 가져오게 되고, 이것을 단순 디컨벌루션하게 되면 반사계수가 최대인 위치가 달라져 정확한 위치나 시간정보를 얻을 수 없다. 하지만 WTBD는 잡음이 저감된 레벨의 신호를 선택해 처리되기 때문에 보다 효과적인 시간분해능을 갖음을 알 수 있다. 반사계수의 진폭오차는 그 크기만을 놓고 보면, 두 기법 모두 원신호의 진폭 정보를 복원하지 못했지만 WTBD 기법을 사용하였을 때 상대적인 진폭의 안정성을 보여 주고 있다. 특히 이는 웨이브렛 변환 과정의 계수 처리를 보정함으로써 극복할 수 있음을 의미한다.

4. 실험 결과

선행 연구에서 초음파 주사 현미경을 통해 반도체 칩과 같이 얇은 다층구조에 대해 WTBD 기법이 실제적인 계면 분리와 들뜸 결합의 검출에 유용함을 검증하였다. 그러나 이것은 깊이 방향 분해능 향상을 위해 고주파 신호를 사용했기 때문에 큰 감쇠를 수반하므로 검사 깊이에 한계성을 가진



(a) Results of error for TOF in deconvolution and WTBD



(b) Results of error for reflect coefficient amplitude in deconvolution and WTBD

Fig. 6 Results of error for TOF and reflect coefficient Amplitude

다. 따라서 본 논문에서는 5MHz의 비교적 낮은 주파수 신호를 사용해 깊이방향으로 훨씬 내부에 얇은 층이 있는 경우를 가상해서 11.44mm의 아크릴 봉에 1.44mm의 얇은 강판을 부착해서 시편을 제작하였다. 또 제작된 시편은 강판의 상하부에서 반사되는 에코는 중첩되도록 하였다.

시뮬레이션에 필요한 초음파 웨이브 신호는 접촉식 탐촉자에 의해 시편으로부터 반사된 신호를 수신하였다. 수신된 신호는 증폭되고 Nyquist 조건을 만족하는 최대 100MHz의 샘플링율로 오실로스코프에서 디지털화된다. 오실로스코프에 수신된 신호는 적당한 시간과 진폭 스케일로 조정되고 GPIB를 통해 컴퓨터로 연결되어 처리하게 된다.

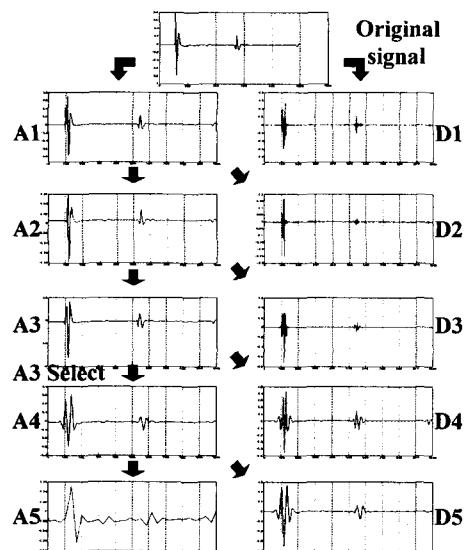


Fig. 7 Subband Filtering by wavelet transform

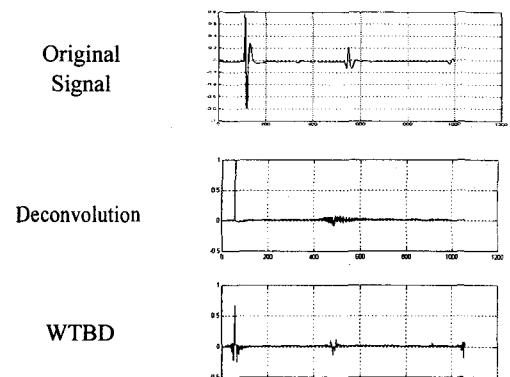


Fig. 8 Deconvolution and WTBD results for A-scan

Fig. 7 은 시편의 A-Scan 신호를 이산웨이브렛 변환에 의해 필터링한 A 성분과 D 성분을 보여 준다. 여기서 레벨 5 이상의 A 성분은 원신호의 특성을 거의 상실하여 제안된 방법에 적용할 수 없게 된다.

Fig. 8 은 중첩된 시편의 신호를 단순 디컨벌루션한 경우와 레벨 3 의 A 성분을 선택하여 WTBD 기법을 적용했을 때 얻어진 반사계수의 분포를 비교한 것이다. 단, 강판의 바닥면의 반사에코는 음향임피던스 차에 의해 위상이 바뀐 형태가 된다. 결과는 모형신호를 시뮬레이션 했을 경우와 마찬 가지로 기존의 디컨벌루션을 적용했을 경우에는 중첩 신호의 특징적인 임펄스 성분을 찾을 수 없지만 제안된 방법에 의한 경우 수식적인 계산 결과와 거의 일치된 TOF 를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 선행연구에서 제안했던 WTBD 기법을 5MHz 의 저주파 범용 초음파 펄스 에코 신호에 적용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제안된 기법은 5MHz 의 저주파 측정신호에 대해서도 기존 디컨벌루션에 보다 우수한 분해능을 보여 주었다.
- (2) 신뢰성 있는 반사계수 분포와 시간분해능을 얻기 위한 필터상수는 0.01 과 0.1 사이에서 적절하였다.
- (3) 제안된 기법의 S/N 비에 대한 적용한계는 초음파 신호의 잡음레벨을 고려해 1dB 이상일 경우에 안정적인 결과를 기대할 수 있고, S/N 비가 커질수록 제안된 방법의 신뢰도가 높아질 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) H. S. Jang, K. Y. Jhang, D. K. Lee, 1997, "The separation of Superimposed Ultrasonic Pulse Echo Signals for Semiconductor Failure Analysis using Scanning Acoustic Tomography", IEEE Int. Reliability Physics Symp. Proc., 35th Annual pp.136-140.
- (2) K. I. McRae, 1990, "Deconvolution Techniques for Ultrasonic Imaging of adhesive joints," Materials Evaluation. Vol. 48, No. 11, pp. 1380-1384.
- (3) 장경영, 장효성, 박병일, 하읍, 2000, "웨이브렛 변환을 이용한 초음파 펄스 에코 신호의 디컨벌루션", 한국비파괴검사학회, Vol. 20, No. 6.
- (4) S. F. Russell, 1994, "Theory of Spread Spectrum Ultrasonic Evaluation," Review of Progress in QNDE, Vol. 13, pp. 841-846.
- (5) Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, 1996, "Wavelet Toolbox User's Guide," The Math Works.
- (6) Amara Graps, 1995, "An Introduction to Wavelets," IEEE Computational Science & Engineering, Vol. 2, No. 2.
- (7) D. E. Newland, 1993, "An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis," Longman Scientific & Technical.
- (8) M. A. Sapia, 1994, "Deconvolution of Ultrasonic Waveforms using Adaptive Wiener Filter," Review of Progress in QNDE, Vol. 13, pp. 855-862.