

캡스트럼 기법을 이용한 다층구조물의 임피던스 해석

Analysis of Impedance of Multilayer Structures using Cepstrum Technique

신진섭*, 전계석*
(Jin-Seob Shin*, Kye-Suk Jun*)

요약

본 논문에서는 다층구조물에 초음파를 입사시켰을 때 반사된 신호를 캡스트럼 기법으로 신호처리하여 각 층의 임피던스 변화를 해석하였다.

이를 위하여 각 층에서 반사된 초음파 반사신호에 삼중 캡스트럼 기법을 적용하여 최대 진폭과 극성을 구하고 이러한 값으로 각 층의 반사계수를 산출함으로써 임피던스를 구할 수 있었다. 실험을 위하여 각각의 층이 서로 다른 금속재질을 갖는 4가지 유형의 다층구조물을 제작하였으며, 초음파 펄스-에코 방법에 의하여 얻어진 반사신호를 캡스트럼 처리하여 임피던스를 측정된 결과 이론치와 잘 일치하였다.

ABSTRACT

In this paper, the impedance for each layer using triple cepstrum signal processing for reflected ultrasonic signal from the multilayer structure has been analyzed.

The reflection coefficient can be obtained from the amplitude and the polarity of the peaks in the triple cepstrum, and then the impedance of each layer has been reconstructed by the reflection coefficient.

In this experiment, four types of multilayers consisting of different metal layers were manufactured. The reflected signals from the multilayer structure have been detected by pulse-echo method. The impedances have been reconstructed by triple cepstrum technique. The experimental results have been in good agreement with the theoretical results.

I. 서론

현대의 산업사회는 PCB, IC, 트랜지스터를 비롯한 여러 소자들이 다층구조로 제작되고 있기 때문에 다층구조물을 초음파를 이용하여 비파괴 검사하는 것은 매우 중요하다.^{[1][2]}

알려지지 않은 두께의 등방성 매질로 구성된 층에 대한 반사계수의 측정은 두께측정과 매질의 밀도와 속도를 알 수 있는 음향 임피던스의 측정을 가능하게 하므로 음향학뿐만 아니라 의학, 지진학 등에서 많은 관심의 대상이 되고 있다.^[3] 또한 다층구조물에서 각 층의 임피던스는 반사계수와 투과계수를 결정하는 매질 고유의 값이므로 이를 초음파를 이용하여 예측함으로써 다층구조물의 각 층을 비파괴적으로 해석할 수 있다. 그러나, 전달된 펄스가 대역이 제한되어지며, 매질에서의 링잉현상, 층들이 너무 가까울 때 발생하는 중첩현상 등으로 각 층에서 반사된 신호는 구별이 어렵게 된다. 캡스트럼은 이러한 중

첩된 신호로부터 반사신호의 도착시간을 구하기 위해 Bogert 등에 의해 처음으로 기술되어졌으며,^[4] 각 층에서 반사된 신호의 가시도를 높이고 도착시간을 분리하는 데 효율적이다.^{[2][6]}

본 논문에서는 삼중 캡스트럼(triple cepstrum) 기법을 이용하여 다층구조물에서 반사된 신호의 최대 진폭과 극성을 구하고 반사계수를 산출함으로써 각 층의 임피던스를 결정하고자 한다. 실험에서는 황동-알루미늄, 알루미늄-철, 황동-철, 알루미늄-황동의 서로다른 금속재질을 갖는 다층구조물을 제작하였으며, 중심주파수가 5MHz인 초음파 변환기를 사용하여 펄스-에코 측정방법으로 획득한 초음파 신호를 캡스트럼처리하여 각 층의 임피던스 형태를 이론치와 비교분석한다.

II. 다층 구조물에 대한 캡스트럼 분석

다층 구조물에서 각 층의 1차적 반사신호만을 고려할 경우, 반사계수를 a_i , 임펄스 신호를 $x(t)$ 라 하면 수신된 신호 $X(f)$ 는 식(1)로 나타낼 수 있다.

*경희대학교 전자공학과
접수일자: 1997년 3월 24일

$$X(t) = a_0 u(t - t_0) + a_1 u(t - t_1) + a_2 u(t - t_2) + \dots \quad (1)$$

층이 두 개만으로 이루어졌을 경우 반사된 신호에 대한 스펙트럼은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(\omega) = U(\omega) [a_0 e^{j\omega t_0} + a_1 e^{j\omega t_1} + a_2 e^{j\omega t_2}] \quad (2)$$

식 (2)에서 $U(\omega)$ 는 전달된 펄스의 스펙트럼이며, 이 성분을 제거하기 위하여 위너 필터링(Wiener filtering)을 적용하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(\omega) = X(\omega)W(\omega) = a_0 e^{j\omega t_0} + a_1 e^{j\omega t_1} + a_2 e^{j\omega t_2} \quad (3)$$

$W(\omega)$ 는 위너 필터의 주파수 응답이며 식 (4)와 같다.

$$W(\omega) = \frac{U^*(\omega)}{|U(\omega)|^2 + B} \quad (4)$$

여기에서 *는 공액(conjugate)를 나타내며, B는 잡음감쇄 상수이다.

이 때, 각 층의 신호성분에 대하여 전력 스펙트럼에 로그를 취하면 식 (5)와 같다.

$$\log |Y(\omega)|^2 = \log A^2 [1 + 2a_{01} \cos \omega(t_1 - t_0) + 2a_{12} \cos \omega(t_2 - t_1) + 2a_{02} \cos \omega(t_2 - t_0)] \quad (5)$$

여기에서 $A^2 = a_0^2 + a_1^2 + a_2^2$ (6)

$$a_{ij} = a_i a_j / 2A^2 \quad (7)$$

를 나타낸다.

캡스트럼은 $\log |Y(\omega)|^2$ 의 역푸리에 변환으로 나타내어지며, 작은 차수의 항들을 무시하면 다음과 같은 캡스트럼 $\mathcal{Y}(t)$ 를 얻는다.

$$\mathcal{Y}(t) = c \delta(t) + a_{01} \delta(t - t_{10}) + a_{12} \delta(t - t_{21}) + a_{02} \delta(t - t_{20}) \quad \text{for } t > 0 \quad (8)$$

여기에서 c는 상수이며, $t_{10} = t_1 - t_0$, $t_{21} = t_2 - t_1$, $t_{20} = t_2 - t_0$ 이다.

분해능을 개선하면서 최대 진폭의 극성을 유지하기 위해 $\mathcal{Y}(t)^3$ 인 삼중 캡스트럼(triple cepstrum)이 적용되어진다.

위의 식 (7)에 의해 다음과 같은 반사계수를 얻을 수 있다.

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{a_{12}}{a_{02}} \quad (9)$$

$$\frac{a_2}{a_0} = \frac{a_{12}}{a_{01}}$$

반사계수 a_0 를 기준값으로 하고 반사신호를 캡스트럼

처리하여 얻어진 진폭의 최대값 a_{01} , a_{12} , a_{02} 으로 각 층의 반사계수 값을 얻을 수 있으며, 이러한 반사계수는 다음의 (10)식에 적용하여 각 층의 임피던스를 구할 수 있다.

$$Z(i+1) = \frac{Z(i)(1+a_i)}{(1-a_i)} \quad (10)$$

III. 실험 및 결과

실험에서는 알루미늄, 황동, 철(주조)을 시편으로 선택하였고 다층구조물은 황동-알루미늄, 알루미늄-철, 황동-철, 알루미늄-황동으로 하였다. 금속의 두께는 서로 다르게 하고 금속과 금속과의 접촉면은 매우 얇게 하여(μm 정도) 무시하였다. 초음파 변환기의 중심주파수는 5MHz이며 펄스-에코 방법에 의해 반사신호를 구하였다. 이 때 얻어진 데이터는 샘플링을 25MHz로 하여 HP-IB 보드를 이용하여 획득하였으며, 삼중 캡스트럼에 의해 얻어진 최대 진폭값과 극성을 가지고 얻어진 반사계수로 임피던스를 구하였다.

그림 1은 실험장치의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

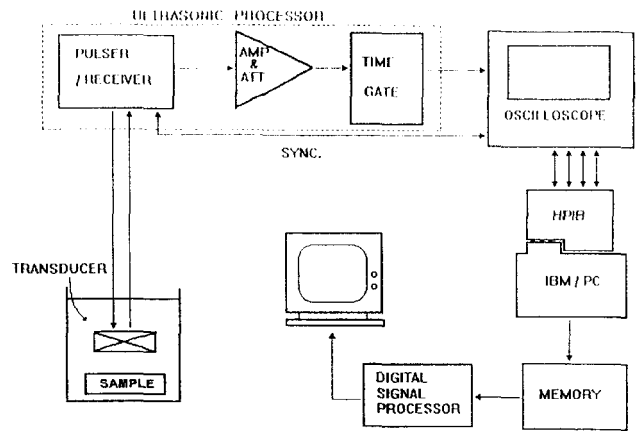


그림 1. 실험장치의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of ultrasonic unit

그림 2는 다층구조물에서 반사된 신호이며, 그림 3(a)와 4(a)는 황동-알루미늄, 알루미늄-철에서 반사된 1차 신호만을 나타낸 것이며, 그림 3(b)와 4(b)는 캡스트럼 처리 후의 신호를 나타내고 있다. 여기에서 나타난 최대 진폭값과 극성, 그리고 실험에서 측정된 반사계수 a_0 를 이용하여 각 층의 반사계수를 산출하였으며 식 (10)에 의하여 임피던스를 구하였다. 그림 5(a)는 황동-알루미늄, 그림 5(b)는 알루미늄-철, 그림 5(c)는 황동-철, 그림 5(d)는 알루미늄-황동의 시편에 대한 임피던스의 변화를 나타내고 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이 반사신호들은 거의 인접하여 나타났다. 그림 3(a)와 4(a)는 두 개의 층에서 첫 번째 층

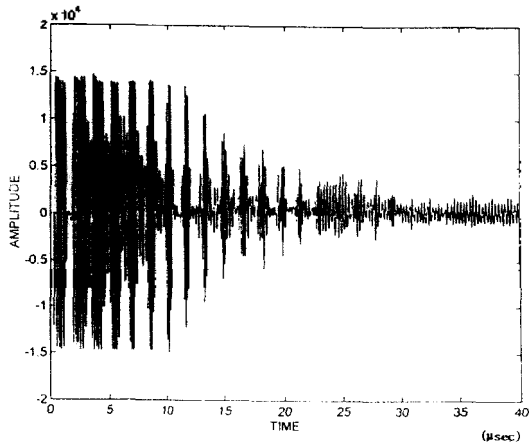
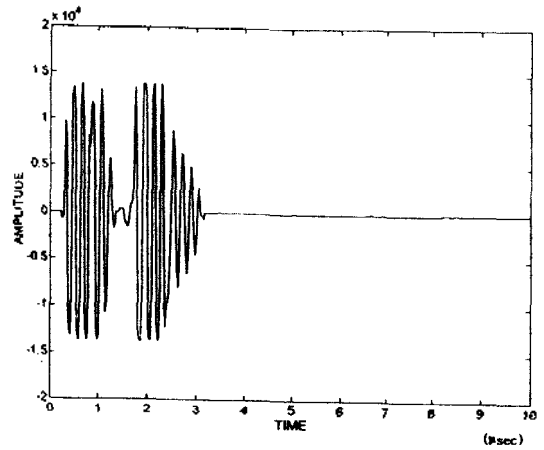
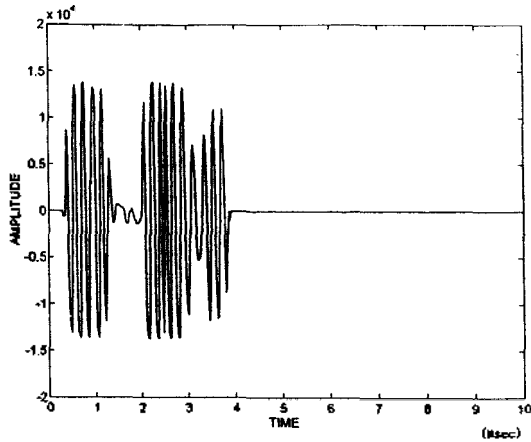


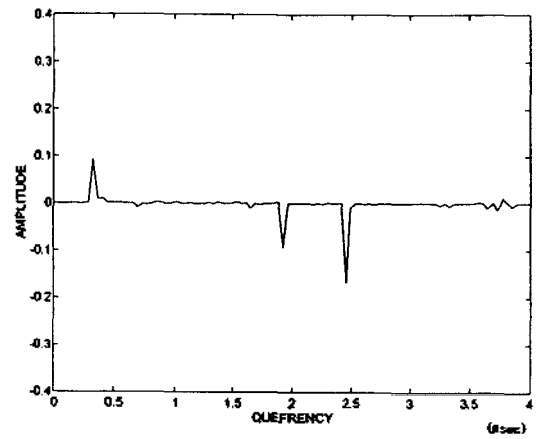
그림 2. 다층구조물에서 반사된 신호
Fig. 2 Ultrasonic signal reflected from multilayer



(a) 반사신호



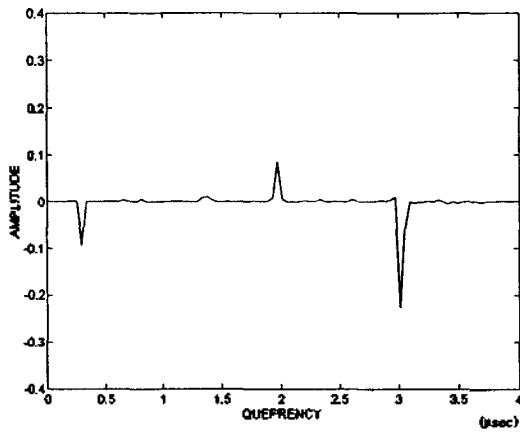
(a) 반사신호



(b) 캡스트럼 처리 후의 신호

그림 4. 다층구조물에서 반사된 신호 및 신호처리 후의 신호(알루미늄-철의 경우)

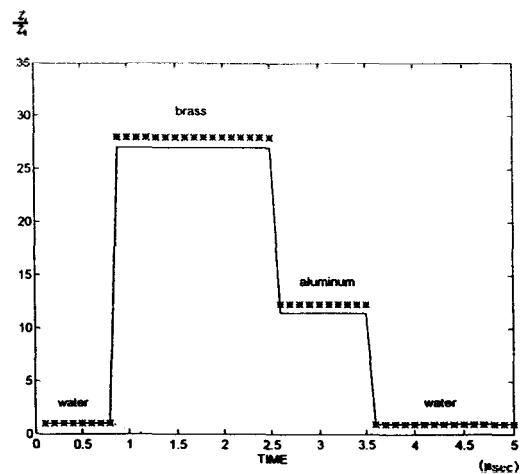
Fig. 4 Ultrasonic signal reflected from multilayer and result of its signal processing(case of aluminum-iron)



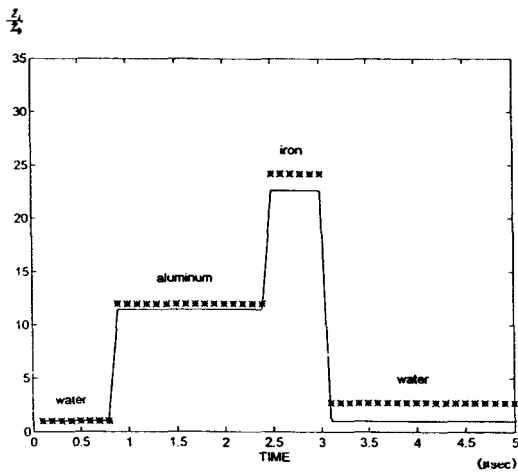
(b) 캡스트럼 처리 후의 신호

그림 3. 다층구조물에서 반사된 신호 및 신호처리 후의 신호(황동-알루미늄의 경우)

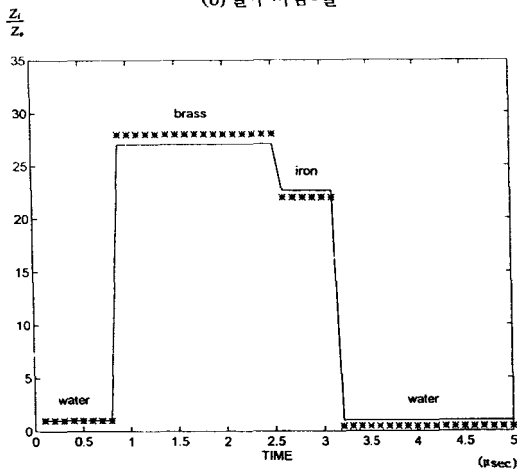
Fig. 3 Ultrasonic signal reflected from multilayer and result of its signal processing(case of brass-aluminum)



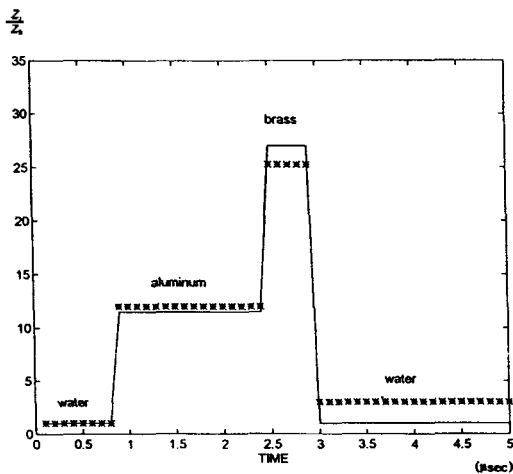
(a) 황동-알루미늄



(b)알루미늄-철



(c)황동-철



(d)알루미늄-황동

그림 5. 임피던스 분포의 이론치와 실험치 비교
Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental values of Impedance pattern

표면에서 반사된 신호와 두 번째 층 표면에서 반사된 신호, 그리고 배면에서 반사된 신호의 세 개의 반사신호만을 게이트시킨 신호를 나타내고 있다. 그림 3(b)와 4(b)는

삼중 캡스트럼 결과를 나타내고 있으며 세 개의 최대 진폭이 형성되었고 이것으로 반사계수를 산출하여 임피던스를 구하였다. 또한 금속의 두께에 따른 반사신호의 간격이 캡스트럼 처리후에도 나타남을 볼 수 있다. 그림 5(a), (b), (c), (d)는 이러한 임피던스를 $\frac{Z_i}{Z_0}$ 의 분포로 나타내어 이론치와 비교하였으며 잘 일치함을 알 수 있었다. 그림 5(b)와 (d)에서 보여진 오차는 금속과 금속의 접착면이 고르지 않은 것에서 발생한 오차로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다층구조물에 초음파를 입사시켰을 때 반사되는 신호를 캡스트럼을 이용하여 반사계수를 구하여 매질의 각 층에 대한 임피던스를 해석하였다.

다중반사신호에서 1차신호만을 삼중 캡스트럼 기법을 적용하여 초음파 신호의 최대 진폭값과 극성으로 반사계수를 산출하였으며, 식 (10)에 의하여 각 층의 임피던스를 구하였다. 실험에서는 금속과 금속으로 이루어진 이중 시편에 중심주파수가 5MHz인 초음파변환기를 사용하여 펄스-에코 방법으로 반사신호를 구하였다. 실험결과 다층구조물에서 반사된 신호는 첫 번째 층과 두 번째 층 표면에서 반사된 신호에 거의 중첩되어 다음 층의 신호가 나타나고 있으며 나머지 층에서 반사된 신호는 거의 나타나지 않았다. 이러한 신호를 삼중 캡스트럼 처리한 결과, 가시도가 개선되어 각 층에서의 서로다른 최대 진폭과 극성을 관찰할 수 있었으며 금속의 두께에 따른 반사신호의 간격이 그대로 나타났다. 따라서, 최대 진폭과 극성차로 반사계수를 산출하고 이것으로 각 층에서의 임피던스를 구할 수 있었으며 임피던스 분포를 나타내어 이론치와 비교한 결과 그림 5와 같이 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

1. J.Saniie, "Pattern Recognition in the Ultrasonic Imaging of Reverberant Multilayered structure", IEEE trans. ultra. 36. No.1, p.80-92, 1989.
2. R.Kue, "Presence of Cepstral Peak in Random Reflected Ultrasound signal", Ultrasonic Imaging 8, p.196-212, 1986.
3. C.C.H. Guyott, P.Cawley, "The ultrasonic vibration characteristics of adhesive joints", J.Acoust.Soc.Am.83(2), p. 632-640, 1988.
4. Jing Bai, Wenkang Qi and Liyun Yu, "A System for the Reconstruction of Acoustic Impedance With High Resolution", Ultrasonics, Vol.31, No.2, p.125-133, 1993.
5. B.P. Bogert, M.J. Healy, and J.W. Tukey, "The quefrency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross cepstrum, and shape cracking", in Time Series Analysis, M.Rosenblatt, Ed. New York: Wiley, chap15, p. 209-243, 1963.
6. J. Saniie, "Resolution and Visibility Enhancement of Ultra-

sonic Echoes Reflected from Targets Hidden by Highly Reverberant Thin Layers", Ultrasonic Symposium, p.903-907, 1984.

7. Alan V. Oppenheim, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice Hall, 1989.

8. D.L Folds, "Transmission and reflection of ultrasonic Wave in Layered media", J.Acoustic.Soc.Am. Vol.62, No.2, p. 1102-1108, 1977.

▲전 계 석(Kyo-Suk Jun)

제14권 6호 참조

현재:경희대학교 공과대학 전자공학과 교수

▲신 진 섭(Jin-Seob Shin)



1989년 2월:호서대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)

1991년 2월:경희대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1991년 3월~현재:경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정