

켄스트럼 초음파 신호 처리를 이용한 두께 측정

Thickness Measurement by Using Cepstrum Ultrasonic Signal Processing

최영철*[†], 박종선***, 윤찬훈*, 최희주*

Young-Chul Choi*[†], Jong-Sun Park***, Chan-Hoon Yoon* and Heui-Joo Choi*

초 록 초음파 두께 측정 방법은 초음파가 표면에서 되돌아오는 시간을 측정하여 두께를 측정하는 비파괴 검사 방법이다. 이때 초음파 진행 시간은 펄스의 최대값을 이용하여 측정하기 때문에, 물체의 두께가 얇을 경우 펄스 신호가 서로 중첩이 되어 기존의 초음파 방법으로 측정하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 파워켄스트럼과 최소분산켄스트럼을 사용하여 두께를 측정하는 방법을 제안하고자 한다. 켄스트럼 신호 처리는 초음파 신호를 임펄스 트레인과 전달함수(초음파 펄스 신호)로 분리하기 때문에 표면에서 돌아오는 초음파 신호의 시간을 임펄스 트레인의 주기로 정확하게 측정할 수 있다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 다양한 두께를 가진 철, 아크릴 시편에 대해 실험을 수행하였다. 두께가 얇은 시편에 대해서는 펄스가 중첩이 되기 때문에 기존방법으로 측정이 어려움을 알 수 있었다. 하지만 제안된 방법인 켄스트럼 초음파 신호 처리를 적용한 결과 임펄스 신호로 분리하기 때문에 두께를 정확히 측정함을 알 수 있었다.

주요용어: 두께 측정, 파워켄스트럼, 최소분산켄스트럼, 초음파

Abstract Ultrasonic thickness measurement is a non-destructive method to measure the local thickness of a solid element, based on the time taken for an ultrasound wave to return to the surface. When an element is very thin, it is difficult to measure thickness with the conventional ultrasonic thickness method. This is because the method measures the time delay by using the peak of a pulse, and the pulses overlap. To solve this problem, we propose a method for measuring thickness by using the power cepstrum and the minimum variance cepstrum. Because the cepstrums processing can divides the ultrasound into an impulse train and transfer function, where the period of the impulse train is the traversal time, the thickness can be measured exactly. To verify the proposed method, we performed experiments with steel and, acrylic plates of variable thickness. The conventional method is not able to estimate the thickness, because of the overlapping pulses. However, the cepstrum ultrasonic signal processing that divides a pulse into an impulse and a transfer function can measure the thickness exactly.

Keywords: Measuring Thickness, Power Cepstrum, Minimum Variance Cepstrum, Ultrasonic Wave

1. 서 론

탐촉자에서 생성되어 재질의 내부로 전달된 음파는 재질의 경계 또는 내부결함 즉 틈, 다름 재질의 침투, 단절 등에서 반사되어 탐촉자로 돌아온다. 초음파의 이러한 특성을 이용하여 재질의 두께 및 결함의 크기와 위치를 측정하는 방법을 ‘펄스-에코방식’이라 부르며 대부분의 초음파검사

방법에서 사용된다. 펄스-에코 방식을 사용한 두께측정기는 탐촉자에서 생성된 초음파 펄스를 시험체 내부로 전달시키고, 다시 시험체의 반대편이나 내부결함 등에서 반사하여 탐촉자로 되돌아오는 초음파 신호를 분석하여 정밀한 두께 측정을 수행한다. 대부분의 측정에서 이러한 펄스의 진행은 단지 수 마이크로세컨드 이내의 매우 짧은 시간이며 이러한 시간의 측정은 두께측정기

[접수일: 2014. 5. 7, 수정일: 2014. 7. 21, 게재확정일: 2014. 8. 18] *한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부, **충남대학교, †Corresponding Author: Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353 Korea (E-mail: cyc@kaeri.re.kr)

내부의 클럭을 이용한다. 재질을 통과한 초음파의 왕복시간을 2로 나누고 다시 그 재질의 고유한 음속값을 곱하면 재질의 두께를 측정할 수 있다. 즉 아래의 식에 의해 두께를 예측하게 된다.

$$S = \frac{C \cdot T}{2} \tag{1}$$

여기서 S는 시험체의 초음파 진행거리, C는 시험체의 초음파 속도, 그리고 T는 초음파 진행시간을 의미한다. 식(1)에서 T, 즉 초음파 진행시간을 측정함으로써 두께를 예측하게 되는데, 일반적으로 처음 되돌아오는 초음파 신호의 피크값까지의 시간지연을 측정하게 된다.

Fig. 1은 전형적인 초음파 신호를 보여주고 있다. 펄스 간격인 T를 측정함으로써 식(1)에 대입하여 두께를 예측한다.

하지만, Fig. 2와 같이 두께가 얇은 매질의 경우 펄스가 중첩이 되기 때문에 기존 방법으로는 펄스 간격 T를 정확하게 추정하기 어려움을 쉽게 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 식(1)에서 초음파 진행시간인 T를 정확하게 찾으므로써 두께를 정확하게 찾는 방법을 제안하고, 두께가 얇은 아크릴 판에 대해 실험 검증을 수행한다.

2. 이론적 배경

본 논문에서는 켈프스트럼(cepstrum)을 이용한 초음파 두께 측정 방법에 대해 제안한다. 켈프스트럼 신호 처리는 펄스 신호를 전달함수와 임펄스로 분리하고, 이 임펄스에는 시간지연 정보를 가지기 때문에 초음파 진행시간을 기존 방법에 비해 더욱 정밀하게 측정할 수 있다. 켈프스트럼에는 여러 종류가 있는데, 그 중에서 파워켈프스트럼(power cepstrum)[1,2]과 잡음에 강한 최소분산켈프스트럼(minimum variance cepstrum)[3]을 적용하여 초음파 두께 예측에 적용하여 본다.

2.1. 파워켈프스트럼[1]

Fig. 3은 파워켈프스트럼 방법을 그림으로 도식화한 것이다. 켈프스트럼이란 파워스펙트럼을 log 취한 후, 역 푸리에 변화(inverse Fourier transform)을 한 신호처리를 말한다. 주로 메아리 검출이나 베어링 결함 검출에 많이 사용하는 신호처리방법이

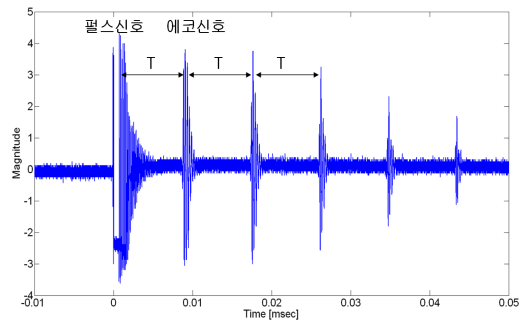


Fig. 1 Ultrasonic wave, where T is the time of wave propagation(the traverse time)

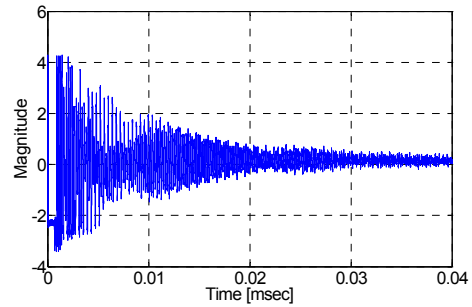


Fig. 2 Ultrasonic wave for a thin plate

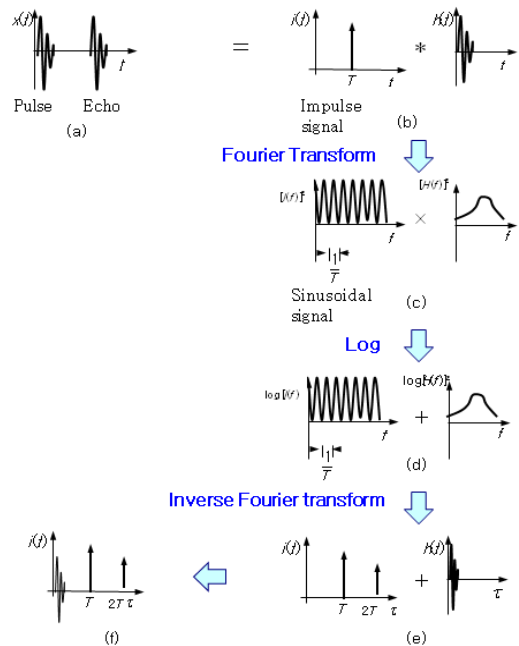


Fig. 3 Method for measuring thickness by using a power cepstrum

다. 실제 초음파 신호인 Fig. 1 신호를 Fig. 3(a)와 같이 간단하게 모델링할 수 있다. 이 신호는 Fig. 3(b)와 같이 펄스 신호와 임펄스 신호의 컨볼루션(convolution)으로 표현할 수 있다. 이 신호를 Fourier transform을 취하면 임펄스 신호는 조화함수로, 컨볼루션은 곱하기로 변하게 된다. 이것을 제곱하여 log를 취하면 Fig. 3(d)와 같이 곱하기는 더하기로 변하게 된다. 마지막으로 inverse Fourier transform을 취하게 되면 조화신호는 임펄스 트레인(impulse train)으로, 그리고 펄스 신호는 Fig. 3(d)와 같이 앞부분으로 몰리게 된다. 따라서 초음파 진행시간인 T는 임펄스 형태로 나타나기 때문에 정확하게 T를 찾을 수 있게 된다.

제안된 방법을 수식으로 증명하면 다음과 같다. 우선, Fig. 3(a) 신호를 다음 식과 같이 수식으로 모델링할 수 있다.

$$y(t) = h(t) + Ah(t) * \delta(t - T) \quad (2)$$

여기서 $y(t)$ 는 초음파 센서에서 측정된 신호이며, $h(t)$ 는 펄스 신호, A는 감쇄량, *는 컨볼루션(convolution), T는 에코신호까지의 진행시간, 그리고 δ 디락 델타함수를 의미한다.

식(2)를 푸리에 변환(Fourier transform)을 취하면 다음식과 같이 유도되어 진다.

$$Y(\omega) = H(\omega) + A \times H(\omega) \times e^{-j\omega T} \\ = H(\omega) \{1 + Ae^{-j\omega T}\} \quad (3)$$

여기서 $Y(\omega)$ 와 $H(\omega)$ 는 각각 $y(t)$ 와 $h(t)$ 의 푸리에 변환을 한 값이며, ω 는 각 주파수, j 는 허수, 그리고 e 는 지수를 의미한다.

파워스펙트럼을 구하기 위해 제곱을 취한 후

$$|Y(\omega)|^2 = |H(\omega)|^2 \{1 + Ae^{-j\omega T}\} \{1 + Ae^{j\omega T}\} \quad (4)$$

Log를 씌우면 다음 식과 같이 곱하기는 더하기로 유도되어 진다.

$$\log|Y(\omega)|^2 = \log|H(\omega)|^2 \\ + \log|1 + e^{-j\omega T}|^2 + \log|1 + e^{j\omega T}|^2 \quad (5)$$

Tayer 급수 $\left(\log(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots\right)$ [4]에 의해 식(5)를 다시 정하면 다음식과 같다.

$$\log|Y(\omega)|^2 = \log|H(\omega)|^2 \\ + Ae^{-j\omega T} - \frac{1}{2}Ae^{-2j\omega T} + \dots \\ + Ae^{j\omega T} - \frac{1}{2}Ae^{2j\omega T} + \dots \quad (6)$$

식(6)을 푸리에 역변환(inverse Fourier transform)을 취해 캡스트럼(cepstrum) 영역으로 바꾸면 다음식과 같이 유도되어 진다.

$$C_Y(\tau) = C_H + A\delta(\tau + T) - \frac{1}{2}A^2\delta(\tau + 2T) + \dots \\ + A\delta(\tau - T) - \frac{1}{2}A^2\delta(\tau - 2T) + \dots \quad (7)$$

여기서 $C_Y(\tau)$ 와 $C_H(\tau)$ 는 $\log|Y(\omega)|^2$ 과 $\log|H(\omega)|^2$ 의 푸리에 역 변환한 값을 의미한다.

식(7)에서 볼 수 있듯이 캡스트럼 영역에서 초음파 진행시간인 T는 임펄스 트레인(impulse train) 형태로 나타남을 알 수 있다. 따라서, 기존 방법에 비해 초음파 진행시간인 T를 정확하게 측정할 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

2.2. 최소분산캡스트럼[3]

최소분산캡스트럼의 일반식은 다음과 같다.

$$F_{MVC} = \frac{I}{\mathbf{e}^H (\mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w})^{-1} \mathbf{e}} \quad (8)$$

여기서 R은 신호의 가지상관행렬을 의미하고, $\mathbf{e} = [1, e^{j\tau}, \dots, e^{jp\tau}]^T$ 를 나타낸다. 그리고 위첨자 H는 허미션, p는 밴드 패스 리프터의 차수, T는 전치(transpose)를 의미한다.

제안된 방법을 수식으로 증명하면 다음과 같다. 우선, 초음파 신호를 다음과 같이 수식으로 모델링할 수 있다.

$$y(t) = h(t) * \sum_{m=0}^N A_m \delta(t - T_m) + n(t) \quad (9)$$

여기서, $n(t)$ 는 백색잡음(white noise)를 의미한다. 임펄스 신호를 조화함수로 만들기 위해 (9)식을 t에 대해 푸리에 변환을 하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$X(\omega) = H(\omega) \sum_{m=1}^N A_m e^{jT_m \omega} + N(\omega) \quad (10)$$

주파수 영역에서 $H(\omega)$ 는 많은 경우 $e^{jT_m\omega}$ 에 비해 변화율이 작아 H 로 일정하다고 가정할 수 있기 때문에 (10)식에 대한 자기상관함수(auto-correlation function)의 역행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{R}_X^{-1} = \frac{1}{\xi^2} \left[\mathbf{I} - \sum_{m=1}^N \frac{H^2 A_m^2}{\xi^2} \frac{1}{1 + (p+1) \frac{H^2 A_m^2}{\xi^2}} \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^H \right] \quad (11)$$

여기서 ξ^2 은 노이즈 $n(t)$ 를 푸리에 변환을 한 $N(\omega)$ 의 분산을 나타낸다. 신호 $x(t)$ 의 자기상관행렬 \mathbf{R}_x 와 $x(t)$ 를 푸리에 변환을 한 $X(\omega)$ 의 자기상관행렬 \mathbf{R}_X 는 다음과 같은 관계를 가지기 때문에

$$\mathbf{R}_X = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad (12)$$

(11), (12)식을 (8)식에 대입하면 (9)식에 대한 최소분산캡스트럼 식을 얻을 수 있다.

$$F_{MVC} = \frac{\xi^2}{(1+p) - \sum_{m=1}^N \frac{\xi^2}{1 + (p+1) \frac{H^2 A_m^2}{\xi^2}} |\mathbf{e}_m^H \mathbf{e}_m|^2} \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{e}_m^H \mathbf{e}_m$ 는 사각 윈도우(rectangular window)를 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 한 형태이기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{e}_m^H \mathbf{e}_m = \sum_{k=0}^p e^{jk(\tau - T_m)} \quad (14)$$

따라서 τ 가 T_m 와 같을 때와 다를 경우로 나누어 보면 (13)식은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$F_{MVC} \cong \begin{cases} \frac{\xi^2}{1+p} + H^2 A_m^2 & ; \tau = T_m \\ \frac{\xi^2}{1+p} & ; \tau \neq T_m \end{cases} \quad (15)$$

τ 가 T_m 와 같은 곳, 즉 m 번째 임펄스 위치에서는 리프터의 차수(p)를 증가시키에 따라 F_{MVC} 값은 노이즈를 푸리에 변환한 $N(\omega)$ 의 분산(ξ^2)만이 줄어들기 때문에 임펄스의 신호 파워와 관계된 $H^2 A_m^2$ 으로 수렴함을 알 수 있다. 하지만 τ 가 T_m 와 다른 곳에서는 리프터의 차수가 증가함에 따라 F_{MVC} 값은 계속해서 줄어들게 되어 Fig. 1(e)와 같이 노이즈 속에 묻혀 있는 임펄스 신호를 검출할 수 있게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

앞장에 이론적으로 검토해본 파워캡스트럼과 최소분산캡스트럼 방법으로 초음파 두께 측정에 적용할 수 있는지 실험으로 검증하여 본다.

3.1. 철 시편 실험

Fig. 4는 초음파를 이용한 두께 측정 실험장치 사진 및 구성도를 보여주고 있다. 이때 초음파 센서의 공진주파수는 5 MHz이며, 200 MHz의 샘플링으로 데이터를 취득하였다. 이때 tone-burst 신호를 주기 1 ms로 발생시켰다.

두께 측정 대상은 두께가 25 mm인 철이며, 초음파 측정 결과를 Fig.5에서 보여주고 있다.

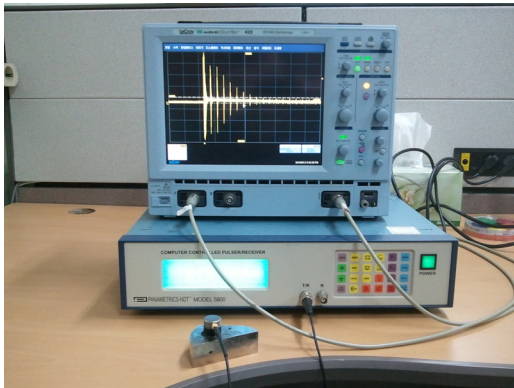
Fig. 5에서 볼 수 있듯이 초음파 센서에서 발진한 신호가 측정 대상물 안에서 계속 반사되어 펄스 트레인 형태로 되고, 또한 감쇄가 작기 때문에 여러 개의 반사파를 관찰할 수 있다.

이때 펄스 사이의 간격이 초음파 진행시간을 의미하며, 센서가 부착되어 있는 면에서 다른 면으로 반사되어 되돌아오는 시간을 나타낸다.

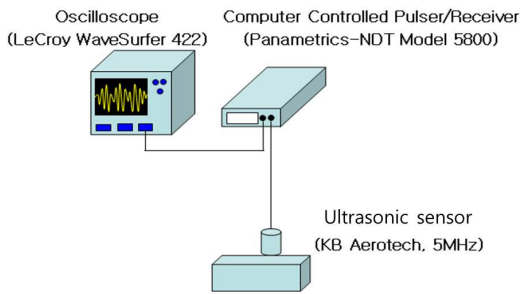
Fig. 6은 초음파 신호인 Fig. 5의 신호를 파워캡스트럼 신호 처리한 결과를 보여주고 있다.

이론식에서 설명하였듯이 캡스트럼 신호 처리란 전달함수와 임펄스 신호를 분리하기 때문에 Fig. 6의 첫 번째 최대값인 8.6 μ s가 펄스 신호사이 간격, 즉 초음파 진행시간을 의미한다.

Fig. 7은 측정된 초음파 신호를 최소분산캡스트럼 신호 처리한 결과를 보여주고 있다. 이때 Fig. 7(a)는 식(15)와 같이 리프터의 차수에 따라 어떻게 변하는지 관찰하기 위해 차수를 5, 10, 20, 40



(a)



(b)

Fig. 4 Experimental setup for measuring the thickness. (a) The picture and (b) Outline of the experiment setup

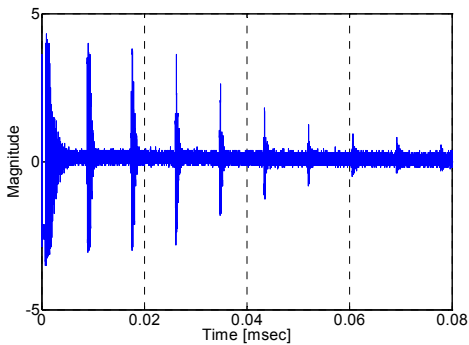


Fig. 5 Measured ultrasonic wave, where the period between pulses means the time of wave propagation

으로 바뀌가면서 계산한 결과를 보여주고 있다.
 식(15)에서도 관찰할 수 있듯이 잡음이 존재하는 구간은 리프트의 차수가 커짐에 따라 값이 작아지지만, 임펄스 지점에서는 값이 변함이 없음을 알 수 있다. 실제 신호 처리에서는 차수가 높

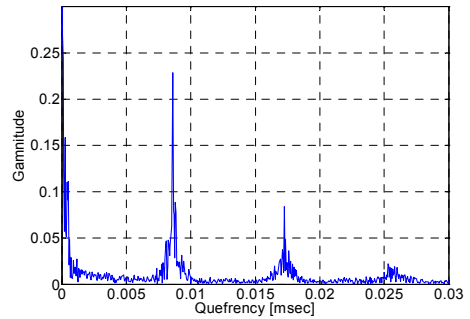
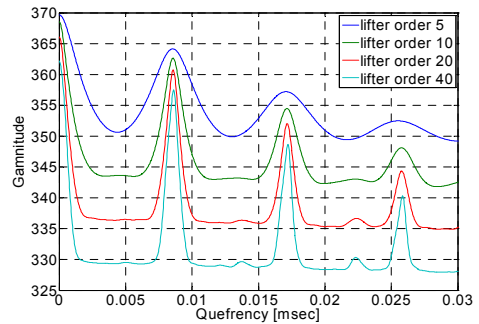
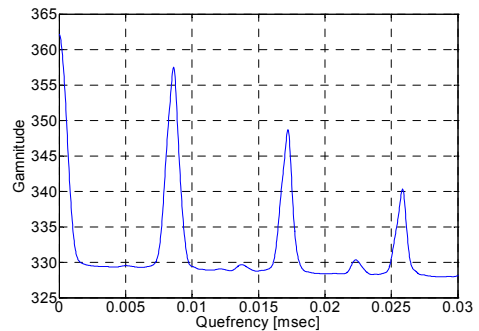


Fig. 6 Power cepstrum result of the measured ultrasonic wave at the steel. We can easily obtain the period of pulses that is 8.6 μ s



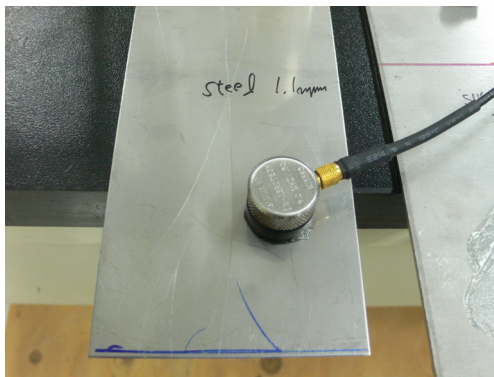
(a)



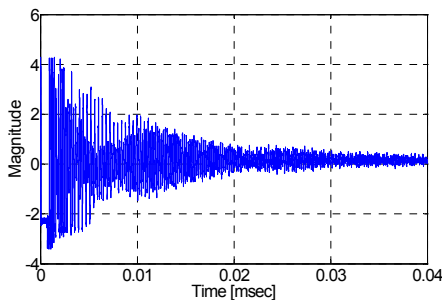
(b)

Fig. 7 Minimum variance cepstrum results of the measured ultra-sonic wave at the steel. (a) Log scale when lifter orders are 5, 10, 20 and 40. (b) Linear scale when lifter order is 40

을 때만 관찰하면 되기 때문에 Fig. 7(b)와 같이 차수가 40일 때 선형스케일로 계산하여 추정해 본 결과 펄스 간격이 파워캡스트럼과 같이 8.6 μ s 임을 확인할 수 있었다.



(a)



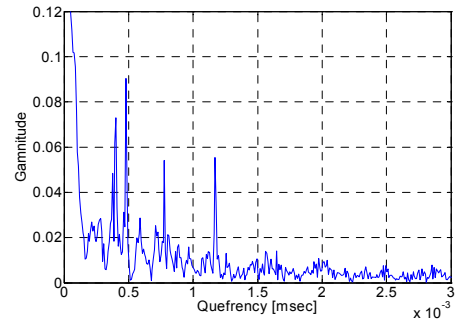
(b)

Fig. 8 Experiments for measuring the thickness of the steel plate with 1.1 mm thick. (a) Picture of steel plate, (b) Measured ultrasonic wave

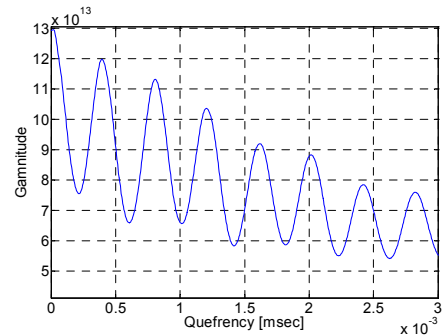
철의 경우 음속(L wave)이 약 5,900 m/sec이지만, Fig. 5에서 기존의 방법으로 초음파 신호의 진행시간을 측정된 결과 8.5 μs 이기 때문에 실험한 시편의 음속은 5,882 m/sec임을 알 수 있다. 따라서, 제안된 방법으로 추정된 두께는 25.29 mm로 추정되며 약 1.1%의 오차로 추정됨을 확인할 수 있었다.

하지만, 이러한 실험결과는 본 논문에서 제안된 cepstrum의 장점을 보여주는 것이 아니다. 사용된 재료가 감쇠가 적은 철이며, 두께가 25 mm로 두껍기 때문에 기존의 방법으로도 충분히 두께를 정확하게 추정할 수 있다.

Fig. 8은 두께가 1.1 mm인 철판에 대해 실험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 실험에 사용된 초음파 센서의 공진주파수가 5 MHz이며, 철판의 음속이 5,882 m/s이기 때문에 파장(wave length)은 1.18 mm임을 알 수 있다. 즉 거의 한 파장에 해당하는 두께를 측정하는 경우이다.



(a)



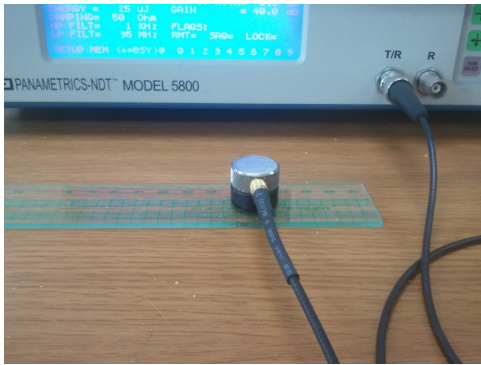
(b)

Fig. 9 Signal processing results for 1.1 mm thick steel plate. (a) Measured time delay is 0.38 μs by using power cepstrum result. (b) Measured time delay is 0.39 μs by using minimum variance cepstrum

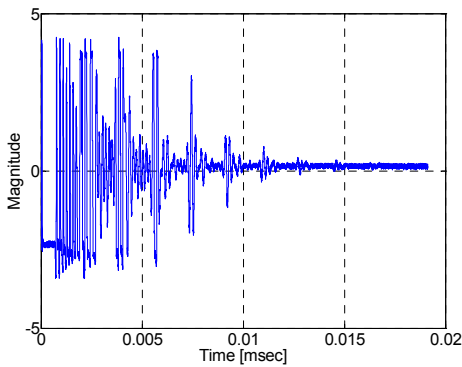
따라서, Fig. 8 (b)에서 볼 수 있듯이 측정된 초음파는 두께에 비해 파장이 크기 때문에 파가 겹쳐서 기존의 방법으로는 두께를 측정하기 어렵다.

Fig. 9(a)는 두께 1.1 mm 철판에 대한 초음파 신호에 파워셉트럼을 적용한 결과를 보여주고 있다. 0~0.5 μs 에서 2개 피크값이 나타나는데, 각각 0.38 μs 와 0.47 μs 이다. 식(7)에 의해 두께에 의한 펄스 신호는 주기적으로 나타나기 때문에 0.38 μs 가 두께와 관련된 주기임을 알 수 있다. 따라서 철판의 음속이 5,882 m/s이기 때문에 예측된 두께는 1.12 mm임을 알 수 있다.

Fig. 9(b)는 최소분산셉트럼 결과를 보여주고 있다. 펄스 신호의 주기가 0.39 μs 이기 때문에 예측된 두께는 1.14 mm임을 알 수 있다. 따라서 두께가 얇은 철판에 대해서도 파워셉트럼은 약 1.8%, 최소분산셉트럼은 약 3.6%의 오차범위에서 잘 예측됨을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 10 Experiments for measuring the thickness of the acrylic plate with 2.35 mm thick. (a) Picture of acrylic plate, (b) Measured ultrasonic wave

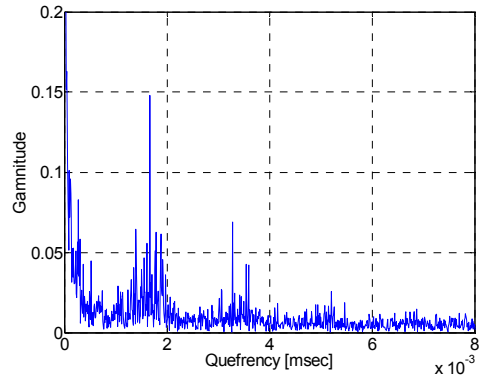
3.2. 아크릴 시편 실험

기존의 초음파 두께로 측정하기 힘든 재료인 두께가 얇은 아크릴에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 10과 같이 두께가 2.35 mm인 아크릴 자로 두께 측정 실험을 수행하였다.

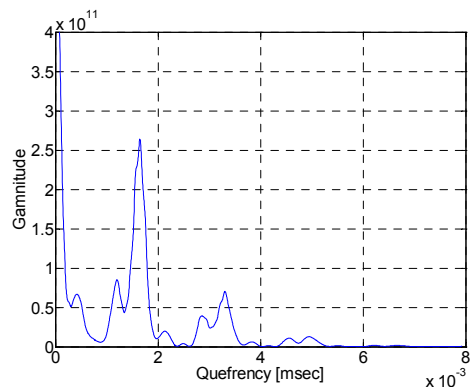
Fig. 9는 초음파로 측정된 신호를 보여주고 있다. 철과 달리 아크릴은 감쇠가 크기 때문에 반사파가 빨리 감소하며, 또한 두께가 얇기 때문에 반사파와 반사파 사이가 겹치게 되어 시간영역에서는 초음파 진행시간을 정확히 추정하는 것이 매우 어려움을 쉽게 알 수 있다.

이러한 신호에 제안된 파워캡스트럼과 최소분산캡스트럼을 적용한 결과 Fig. 10과 같이 초음파 진행시간이 1.66 μ s임을 쉽게 추정할 수 있었다.

아크릴의 초음파 진행 속도가 약 2,830 m/sec 이기 때문에 식(1)에 대입하여 아크릴의 두께를



(a)



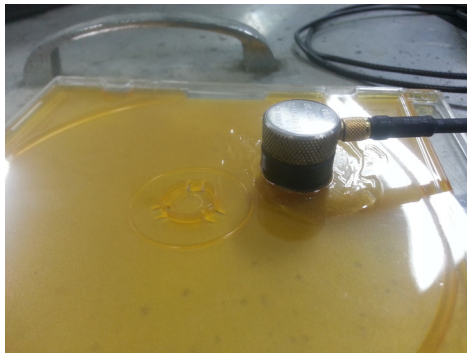
(b)

Fig. 11 Signal processing results for 2.35 mm thick acrylic plate. Measured time delay is 1.66 μ s by using power cepstrum result. (b) Measured time delay is 1.66 μ s by using minimum variance cepstrum

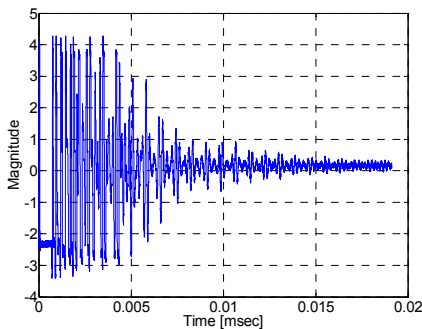
계산하면 약 2.35 mm가 된다. 실제 아크릴 자의 두께가 2.35 mm이기 때문에 두께를 정확하게 예측하였다.

Fig. 10(b)에서 5 μ s 이후에 2개의 피크값이 보이기 때문에 이 두 개의 피크값으로 초음파 진행 시간을 찾아보면 1.7 μ s임을 알 수 있다. 이것을 두께로 환산하여 보면 2.4 mm인데, 제안된 방법보다 오차가 많음을 알 수 있다.

Fig. 12는 두께가 0.7 mm인 아크릴에 대해 실험을 수행한 사진 및 결과를 보여주고 있다. Fig. 12(b)에서 볼 수 있듯이 초음파가 겹치기 때문에 기존의 방법으로는 두께를 예측하기 어려움을 쉽게 알 수 있다. 이것은 실험한 아크릴에서의 파장이 0.57 mm이기 때문에 거의 초음파 한 파장과 두께가 비슷하기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 12 Experiments for measuring the thickness of the acrylic plate with 0.7 mm thick. (a) Picture of acrylic plate, (b) Measured ultrasonic wave

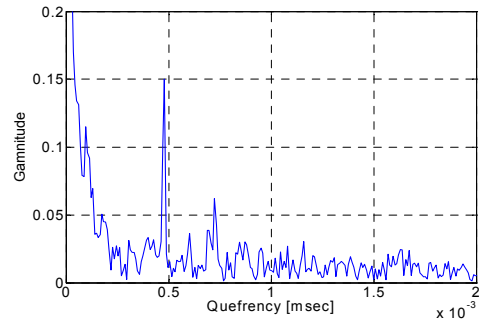
제안된 방법인 파워캡스트럼과 최소분산캡스트럼을 적용한 결과를 Fig. 13에서 보여주고 있다. 두 방법 모두 초음파 진행 시간이 $0.48 \mu\text{s}$ 이기 때문에 예측된 두께는 0.68 mm 이다. 실제 두께가 0.7 mm 이기 때문에 약 2.8%의 오차로 잘 추정함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

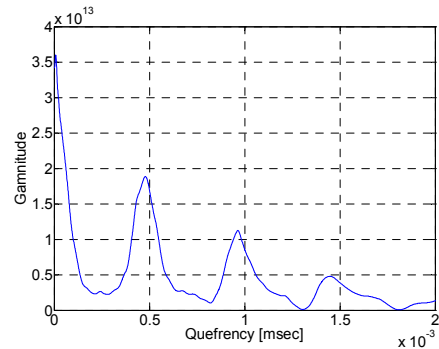
본 논문에서는 파워캡스트럼과 최소분산캡스트럼을 이용하여 초음파 신호를 이용한 두께 측정 방법을 제안하였다.

두께를 측정하는 매질의 두께가 얇을 경우 펄스가 중첩이 되기 때문에 기존의 방법인 시간영역에서 두께를 예측하는 것은 많은 오차를 포함하게 된다.

파워캡스트럼과 최소분산캡스트럼은 초음파 신호를 임펄스 트레인(impulse train) 신호와 전달함



(a)



(b)

Fig. 13 Signal processing results for 0.7 mm thick acrylic plate. Measured time delay is $0.48 \mu\text{s}$ by using power cepstrum result. (b) Measured time delay is $0.48 \mu\text{s}$ by using minimum variance cepstrum

수로 분리한 다음 임펄스 트레인의 주기값을 보여주기 때문에 초음파 진행시간을 정확히 추정할 수 있는 장점이 있다. 제안된 방법을 검증하기 위해 한 파장과 비슷한 두께의 철과 아크릴에 대해 실험을 수행하였다. 두께가 얇은 시편의 두께도 제안된 캡스트럼 방법으로 정확히 추정할 수 있음을 실험으로 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구원의 창의연구사업 지원에 의해 연구되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] R. B. Randall, "Frequency Analysis," B&K, pp. 271-304 (1987)

- [2] B. P. Bogert and M. J. R. Healy, "The quefrency analysis of of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-epstrum and saphe cracking," *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis*, N.Y. pp. 209-243 (1963)
- [3] Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Detection of impulse signal in noise using a minimum variance cepstrum - Application on faults detection in a bearing systems," *Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10 No. 6, pp. 985-990 (2000)
- [4] D. Zwillinger, "Standard Mathematical Tables and Formulate," Champman & Hall/CRC, pp. 36-36 (2003)