

캡스트럼법에 의한 B-모드 영상분해능 향상에 관한 기초적 연구 - 두께측정을 통한 가능성 검토 -

현 병 국*, 박 은 주*, 하 강 열**, 김 무 준**
* 부경대학교 대학원 음향진동공학과, ** 부경대학교 물리학과

A Basic Study on Improvement of Resolution in B-mode Acoustical Images by the Cepstrum Technique - Feasibility Consideration by Thickness Measurement -

Byung-Gook Hyun*, Eun-Ju Park*, Kang-Lyeol Ha**, Moo-Joon Kim**

* Dept. of Acous. & Vib. Eng. in P.K.N.U., ** Dept. of Phys. in P.K.N.U.

Email: haki@dolphin.pknu.ac.kr

요약

물체내부의 단층구조를 나타내는 B-모드 영상은, 물체의 내부 경계로부터의 반사신호를 직접 비디오 신호로 변환하여 그 진폭에 비례하는 휘도 또는 색상으로 나타내고 있다. 그러한 시간영역 파형에 의한 처리에 있어서는 각 신호가 시간적으로 근접해 있을 경우 영상화가 곤란하다. 본 연구에서는 B-모드 영상에 있어서 거리분해능을 향상시키기 위한 방법으로 캡스트럼법을 이용하는 것을 제안하고, 그 방법에 의해 음속이 알려진 얇은 물체의 두께를 보다 정확하게 측정, 표시함으로써 B-모드 영상화에 있어서의 분해능 향상 가능성을 보였다.

I. 서론

최근 의료용 초음파진단장치는 3차원의 화상은 물론 4차원에 해당하는 동영상까지도 구현될 수 있도록 발전하고 있다. 초음파진단장치는 A(Amplitude), B(Brightness), M(Motion), D(Doppler) 등⁽¹⁾ 다양한 모드의 신호 또는 화상을 나타낼 수 있으나, 그 중에서 가장 기본적인 것은 B-모드 상이다. 물체 내부의 단층구조를 나타내는 B-모드 영상은 초음파진단장치 이외에도 비파괴검사(NDT), 어군탐지, 지층탐사 등 다른 용도로 다양하게 이용될 수 있는데, 그것은 음향임피던스가 다른 내부의 경계면에서 반사된 신호에 의해 만들어진다. 즉, 임의의 방향으로 방사된 음파에 의해 시간적으로 분리되어 수신되는 반사신호를 시간차에 해당하는 거리의 지점에

진폭에 비례하는 휘도 또는 색상으로 표시함으로써 영상을 얻고 있다. 이러한 방법에 의한 영상화에 있어서는 분해능(Axial Resolution)이 펄스의 지속시간에 의해 결정되어지는데, 시간적으로 근접해 있는 반사신호는 구분된 화소점(Pixel)으로 영상화 될 수 없게 된다. 따라서, 분해능을 향상시키기 위해서는 고주파의 광대역 트랜스듀서를 사용하여야하나, 현재 의료진단용 또는 비파괴검사용으로 주로 사용되고 있는 수 MHz대의 PZT 트랜스듀서는 일반적으로 두 주기 이상 지속되는 파를 발생시키고 있으며, 그에 따라 거리분해능은 제한되어진다.

본 보고에서는 내부가 어떤 음속을 갖는 물질들에 의해 이루어져 있는가를 알고 있는 다층층상구조 물체에 대해 B-모드 영상분해능, 즉 거리분해능을 향상시키는 한 방법으로 캡스트럼법을 도입하는 것을 제안하고, 그 방법에 의해 얇은 시료의 두께를 보다 정확하게 측정, 표시함으로써 B-모드 영상의 분해능 향상 측면에서의 캡스트럼법의 유효성을 보인다.

II. 캡스트럼에 의한 시료의 두께 측정

1. 캡스트럼법의 적용

임의의 시계열 신호를 푸리에변환하여 얻은 주파수 스펙트럼에 개자 푸리에변환을 행하면, 그 시계열의 신호가 어떤 지연시간 τ 들의 집합에 의해 성립되었는지를 해석할 수 있다. 이와 같이 주파수계열의 데이터를 푸리에변환하여 얻은 일련의 값들은 케프런시(Quefrensy)를 변수로 하는 캡스트럼(Cepstrum) 이라고 부르는데, 캐

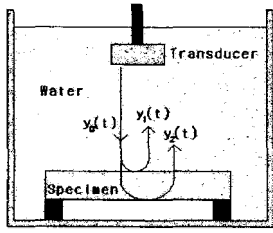


그림 1. 두께측정의
모식도

프런시는 신호간의 시간지연 τ 에 해당한다⁽²⁾.

이 캡스트럼법을 음속이 알려진 시료에 대해 적용하면 시료의 두께에 대한 종래의 펄스반사법보다 정도 높은 측정치를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 보다 얇은 시료에 대한 측정도 가능해진다^(3,4).

그림1과 같이 수중에 놓인 시료에 대해 트랜스듀서에서 방사된 펄스 초음파의 시료 표면에 대한 입사파를 $y_0(t)$, 표면에서의 반사파를 $y_1(t)$, 저면에서 반사되는 파를 $y_2(t)$ 는 라고 할 때, 두 신호간의 시간차 τ 에 의해,

$$\begin{aligned} y_1(t) &= R_{12}y_0(t) \\ y_2(t) &= -R_{12}(1 - R_{12}^2)e^{-2\gamma d}y_0(t - \tau) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

로써 나타내어진다. 여기서 R_{12} 는 물/시료의 경계에 있어서의 반사계수, γ 는 물체에 있어서의 전파정수이고,

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \gamma = \alpha + j\beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

가 된다. 여기서 Z_i 는 복소음향임피던스, α 는 진폭의 감쇠정수, β 는 위상정수, d 는 물체의 두께이다. 지금 신호 $y_1(t)$ 과 $y_2(t)$ 만이 게이트 되었다고 가정하여, 그 두 신호만에 의한 펄스열을 $y(t)$ 로 하면,

$$\begin{aligned} y(t) &= y_1(t) + y_2(t) \\ &= R_{12}y_0(t) + By_0(t - \tau) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{단, } B = -R_{12}(1 - R_{12}^2)e^{-2\gamma d}$$

로 나타내어지며, $y(t)$ 의 푸리에변환 $P(f)$ 는,

$$\begin{aligned} P(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{12}y_0(t)e^{-j\omega t}dt + B \int_{-\infty}^{\infty} y_0(t - \tau)e^{-j\omega t}dt \\ &= [R_{12} + Be^{-j\tau\omega}]P_0(f) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

가 된다. 단, $P_0(f)$ 는 $y_0(t)$ 의 푸리에변환이다. 따라서 그 파워스펙트럼 $|P(f)|^2$ 은,

$$|P(f)|^2 = [R_{12}^2 + B^2 + 2R_{12}B\cos(\tau\omega)]|P_0(f)|^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

로 된다. 식 (5)로부터, 물체 중의 점성 등에 의한 음속의 분산을 무시할 수 있다면 ($\omega/\beta = \text{Const.}$), 그 주파수 축상에서는 $\Delta f = 1/\tau$ 의 일정 주기를 가지는 간섭모양이 나타난다는 것을 알 수 있다. 식(5)에서 구해진 파워스펙트럼을 재차 푸리에변환하면 캐프런시 $1/\Delta f = \tau$ 에 대한 값인 캡스트럼이 얻어지는데, 만약 물체의 음속 v 를 알고 있다면 캡스트럼상의 피크 성분에 대한 τ 로부터 시료의 두께 d 는,

$$d = \frac{v\tau}{2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

에 의해 구해진다. 식(5)에서 알 수 있는 바와 같이 간섭모양은 파워스펙트럼 $|P_0(f)|^2$ 위에 실린 형태로 나타나고, 캡스트럼은 그 간섭모양의 주기를 나타내는 것이므로, $|P(f)|^2$ 에서 $|P_0(f)|^2$ 성분을 미리 제거한 순수한 간섭성분만에 대한 캡스트럼을 얻으면 보다 정확한 두께 측정이 가능해진다.

2. 두께 측정 결과

그림2~4는 중심주파수 2.2 MHz의 초음파 트랜스듀서를 사용하여 공칭두께가 각각 4.7, 5.4, 14.0 mm인 PMMA, 알루미늄, 베크라이트에 대해 스펙트럼분석기를 사용하여 얻은 파워스펙트럼과 그 캡스트럼을 나타내며, 표1은 실험에서 얻어진 두께값을 마이크로미터에 의한 측정치와 비교하여 나타내었다.

[표 1] 두께 측정 시료의 물성 및 측정결과

종류	음속* (%)	두께(mm)		오차 (%)
		마이크로미터	캡스트럼	
PMMA	2640	4.68	4.51	3.63
알루미늄	6260	5.40	5.35	0.93
베크라이트	3629	13.95	14.27	2.24

* : 참고문헌[5]에 의한.

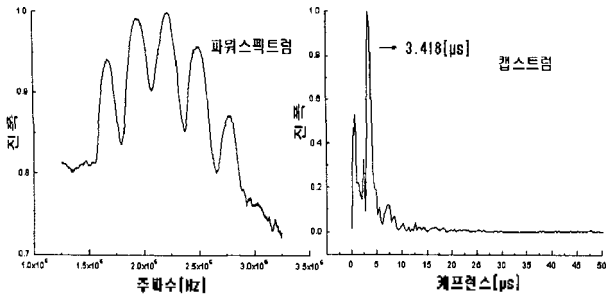


그림 2. 파워스펙트럼 및 캡스트럼(PMMA)

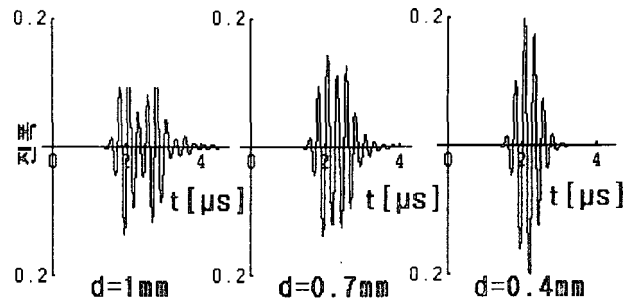


그림 5. 두께에 따른 RF 펄스 다중반사파

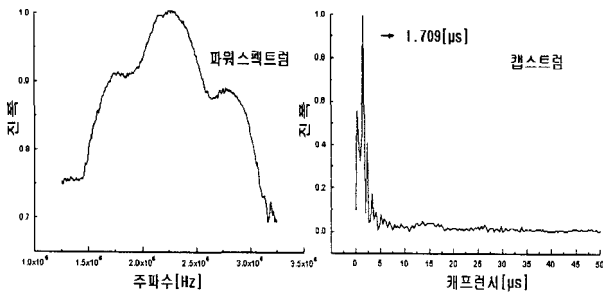


그림 3. 파워스펙트럼 및 캡스트럼(Aluminum)

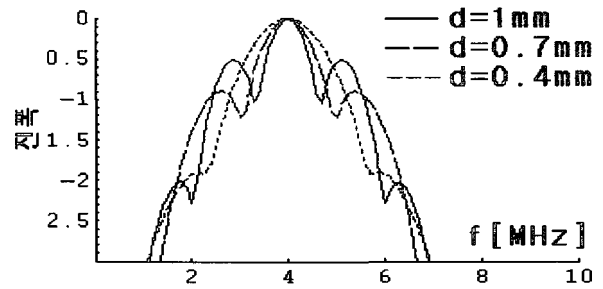


그림 6. 두께에 따른 파워스펙트럼

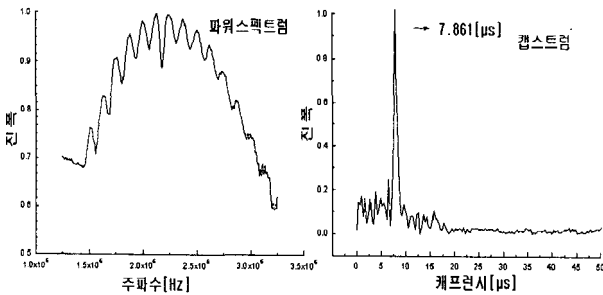


그림 4. 파워스펙트럼 및 캡스트럼(Bakelite)

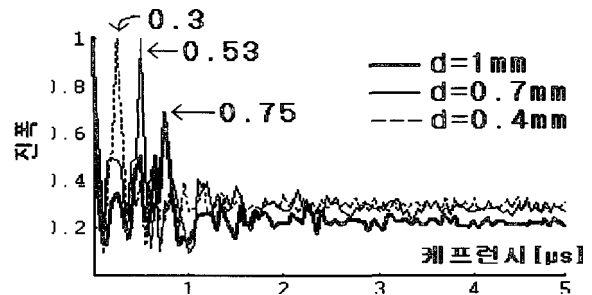


그림 7. 두께에 따른 캡스트럼

3. 얇은 시료에 대한 고려

식(5) 및 상기 그림2~4에서 알 수 있는 바와 같이 $\tau = \frac{2\pi}{F}$ (F : 반복 주파수 간격)에 해당하므로 τ 가 클수록, 즉 kd 가 클수록 파워스펙트럼상의 간섭모양이 많이 나타나므로 캡스트럼상에 한 개의 피크가 뚜렷이 생긴다. 그러나 두께가 얇아지면 시료 표면에서의 반사파와 저면에서의 반사파가 시간영역에서 중첩되어지며, 다중 반사가 생겨 캡스트럼상의 피크가 뚜렷하지 않게 되어 피크치 선정이 어려워진다. 얇은 시료에 있어서 저면에서의 다중반사파는,

$$y_1 = R_{12} y_0$$

$$y_{n+1} = (-R_{12})^{2n-1} (1 - R_{12}^2) y_0 \quad (n=1, 2, 3 \dots) \quad \dots(7)$$

로 나타내어진다. 얇은 시료에 대한 고찰로서 포락선이 가우스분포를 갖고 RF 펄스를 방사하는 중심주파수 4 MHz의 트랜스듀서에 의해 아크릴의 두께를 변화시키면서 측정된 것을 가정한 경우에 다중반사파를 고려한 RF 펄스, 파워스펙트럼, 캡스트럼상의 비교를 그림5~7에 각각 나타내었다.

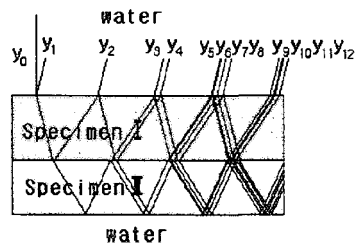


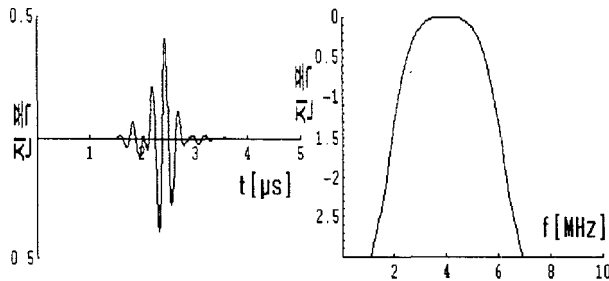
그림 8. 2층구조의 다반사 모델

III. 2층구조에의 적용

다층구조에 대한 가장 단순한 경우로서 2층구조를 생각하면, 다중 반사된 신호는 그림9와 같아지며, 각각은

$$\begin{aligned}
 y_1 &= R_{12} y_0 \\
 y_2 &= R_{23} (1 - R_{12}^2) y_0 \\
 y_3 &= R_{31} (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_4 &= -R_{12} R_{23}^2 (1 - R_{12}^2) y_0 \\
 y_5 &= -R_{23} R_{31} (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_6 &= R_{12}^2 R_{23}^3 (1 - R_{12}^2) y_0 \\
 y_7 &= R_{23}^2 R_{31}^2 (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \dots\dots\dots(8) \\
 y_8 &= -R_{12} R_{23} R_{31} (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_9 &= R_{12} R_{23}^2 R_{31}^2 (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_{10} &= R_{12} R_{23}^3 R_{31}^3 (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_{11} &= -R_{12}^2 R_{23}^3 R_{31}^2 (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_{12} &= -R_{12}^2 R_{23}^3 R_{31}^3 (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) y_0 \\
 y_{13} &= R_{12}^2 R_{23}^3 R_{31}^4 (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2)^2 y_0 \dots\dots\dots
 \end{aligned}$$

이 된다. 폴리에스테르와 용융석영에 의한 2층구조에 대해서 (8)식의 $y_{13}(t)$ 까지를 시간지연을 고려하여 나타낸 파형 및 그 파워스펙트럼은 그림9와 같다. 그림10은 그림9의 캡스트럼이며, 그 해석결과는 표2와 같다.



(a) 시간 파형 (b) 파워스펙트럼

그림 9. 2층구조 RF 펄스 다중반사파와 파워스펙트럼

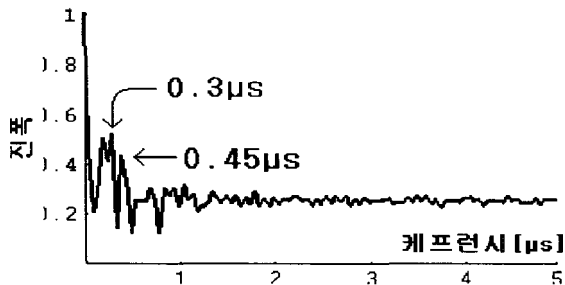


그림 10. 2층구조에 따른 캡스트럼

[표 2] 얇은 2층구조 시료에 대한 해석결과

종류	음속(%)	두께(mm)	
		마이크로미터	캡스트럼법
폴리에스테르(P.E)	2520*	0.393	0.378
Fused Quartz	5973†	0.482	0.449

*는 참고문헌[5], †는 참고문헌[3]에 의함.

IV. 결론 및 향후 과제

알고있는 음속구조를 갖는 물질들로 이루어진 층상구조 물체에 대해 B-모드 영상분해능, 즉 거리분해능을 향상시키는 한 방법으로써 캡스트럼법을 도입하는 것을 제안하고, 얇은 시료의 두께를 보다 정확하게 측정, 표시함으로써 B-모드 영상화에 있어서의 캡스트럼법의 유효성을 확인하였다. 향후 연구 계획으로는 보다 복잡한 구조의 물체에 대한 측정 및 해석과 영상처리의 단계로 나아갈 것이다.

* 본 연구는 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비 지원에 의해 수행되고 있음.

참고문헌

- (1) 日本超音波醫學會 ; “超音波診斷”, 醫學書院, pp12~53, 1990.
- (2) 日野幹雄 ; “スペクトル解析”, 朝倉書院, 14 ed. , pp 280~287, 1986.
- (3) 하강열, 김부준, 이종규, 김성부, 中鉢憲賢 ; “초음파 펄스의 주파수해석에 의한 재료의 음향특성 측정” 한국음향학회지, 제 14권 제6호, pp.40~47, 1995.
- (4) M. Houze, B. Nongaillard, M. Gazelet, J. M. Rouvaen, and C. Bruneel ; “Measurement of the thickness of thin layers by ultrasonic interferometry” J. Appl. Phys. 55(1), pp194~198, 1983.
- (5) 實吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 ; “超音波技術便覽” 日刊工業新聞社, 東京, pp.1325~1355, 1989.