

주파수 응답특성을 이용한 산란체 간격 추정

김은혜, 윤관섭, 나정열

한양대학교 과학기술대학 지구해양과학과

Estimation scatterer spacing with spectral response

Eunhye Kim, Kwan-seob Yoon, Jungyu Na

Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University

E-mail: ehkim@ihanyang.ac.kr

요 약

음향수조 내에 일정한 간격으로 배열된 단순 모양의 산란체들로부터 획득된 후방산란 신호를 분석하여 산란체 간격(scatterer spacing)을 추측 할 수 있는 방법을 연구하였다. 수신신호의 산란특성을 켈스트럼 피크(cepstral peaks)를 이용하여 산란체 간격으로 해석하였다. 임펄스 응답신호를 이용한 수치계산으로 산란체 간격 추정방법을 검증한 후, 수조 실험으로 획득한 후방산란 신호에 적용해 그 결과를 비교해 보았다.

1. 서 론

규칙적으로 분포한 산란체들에 의한 후방산란 에너지는 위상과 진폭 스펙트럼에 산란체 간격(scatterer spacing) 및 분산(variance)에 관계된 정보를 포함하고 있으며 이러한 후방산란 신호의 주파수 응답특성을 이용, 산란체들의 간격을 추정하여 생체 조직을 특성화하는 방법이 연구되었다[1]. 산란체 간격 변수는 처음 의학 분야에서 초음파(ultrasonic pulse)를 이용하여 정상(normal)의 간(liver) 조직과 간경화(cirrhotic)인 조직을 구별하기 위해 Fellingham과 Sommer에 의해 제안된 방법이며[2], 그들의 알고리즘은 파워 스펙트럼

(Power Spectral Density)의 스펙트럼 피크(spectral peak) 탐지에 기초를 두고있다. 켈스트럼(cepstrum) 역시 초음파를 이용한 조직의 특성화에 파워 스펙트럼의 시스템 영향을 줄이기 위한 방법으로 Kuc에 의해 소개된 후[3], 현재 음성신호 처리, 지진 신호 및 생체 신호처리 등에 광범위하게 응용되고 있다.

본 논문에서는 수조에 일정한 간격으로 배열된 단순 모양의 산란체들에 의한 수신신호의 산란특성을 켈스트럼 피크를 이용, 산란체 간격으로 해석하여 산란체들의 분포 양상을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 켈스트럼(Cepstrum) 함수

켈스트럼은 '대수(logarithm) 파워 스펙트럼의 역 푸리에 변환'으로 정의된다. 파워 스펙트럼의 주기성은 켈스트럼에서 우세 피크(dominant peak)로 나타나며 이것은 산란체 간격을 결정하는데 사용되어진다.

산란체 간격 추정을 위한 켈스트럼의 적용은 다음과 같이 간단한 예로 설명된다[4]. 트랜스듀서의 전기적 특성 및 회절(diffraction)과 감쇠(attenuation)를 포함하는 산란함수가 $h(t)$ 일 때, 임펄스 $x(t)$ 를 입력 신호로 하는 시스템의 출력 $y(t)$ 는 식(1)과 같다.

$$y(t) = x(t) * h(t) \tag{1}$$

거리 d 만큼 분리되어 있는 두개의 독립적인 산란체가 있다고 가정할 때, $h(t)$ 는 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$h(t) = s(t + t_0) + s(t + t_0 + 2d/c) \quad (2)$$

여기서 c 는 음속이며, 식(2)의 오른쪽 항의 '2'는 이미징 구조(imaging geometry)로 인한 반사(reflection)를 고려한 것이다. 수신 신호에 대한 파워 스펙트럼을 구하면 식(3)과 같고,

$$Y(f) = X(f)H(f)$$

$$|Y(f)|^2 = |X(f)|^2 |H(f)|^2 \left| 1 + e^{-i2\pi f(2d/c)} \right|^2 \quad (3)$$

이후에 캡스트럼의 핵심 과정인 대수(logarithm)를 취하면 시스템의 연산이 곱셈관계가 아닌 덧셈의 관계로 변환이 된다(식4).

$$\log|Y(f)|^2 = \log|X(f)|^2 + \log|H(f)|^2 + 2\log\left| 1 + e^{-i2\pi f(2d/c)} \right| \quad (4)$$

식(4)의 마지막 항이 수신신호가 가진 $c/2d$ 만큼의 주기를 나타낸다. 이것은 캡스트럼 계산과정의 마지막 단계인 역 푸리에 변환으로 시간 영역 $t = 2d/c$ 에서 피크로 증명이 된다.

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (5)$$

결국 산란체 간격(d)은 파워 스펙트럼으로 평가된 캡스트럼의 우세 피크의 위치(Δt)로부터 계산될 수 있다.

3. 임펄스 응답신호 열 (A train of impulse response)을 이용한 수치 계산

2장의 산란체 간격 추정을 위한 캡스트럼의 이론적

접근을 토대로 주기적인 임펄스 응답신호를 이용한 모의신호로 수치 계산을 실시하였다.

트랜스듀서 정면에 5개의 가상 산란체가 임의로 설정한 간격으로 차례로 나열되어 있을 때, 이 산란체들에 의한 후방산란 신호를 식(6)의 임펄스 응답함수 $h(t)$ 를 이용하여 진폭, 감쇄상수, 주파수를 포함하도록 모의하였다.

$$h(t) = A(t)e^{-\alpha t} \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

$A(t)$: 진폭, α : 감쇄상수, f : frequency

그림 1(a)는 식(6)에 의하여 모의된 신호로 잡음(noise)성분이 포함된 주기적인(신호의 간격은 1.25msec로 설정) 임펄스 신호이며, 이것은 시간이 증가하면서 강도가 점차 감소된 상태이다. 그림 1(b)는 응답신호에 대한 대수(logarithm) 파워 스펙트럼으로 그림 1(a)의 임펄스 신호 간격이 오른쪽 정면 내의 0.8Hz의 주파수 피크(spectral peaks) 간격으로 나타났다. 이것이 다음 단계인 역 푸리에 변환 후, 진폭 캡스트럼에서 임펄스 신호의 간격이 누적(대수를 취하므로 선형시스템의 중첩의 원리가 성립)되어 그림 1(c)의

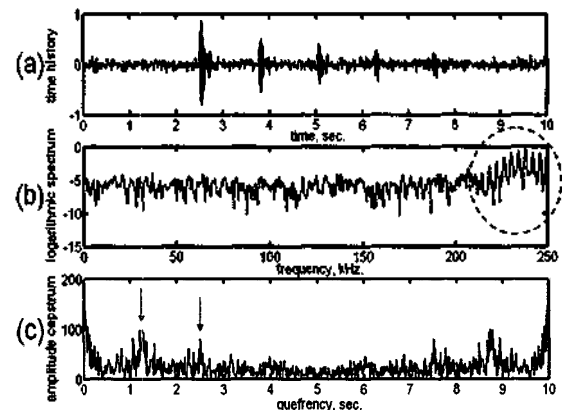


Fig. 1. A train of the scattering response of the regular spaced simple scatterers. (a) shows the time series of backscattered signal. (b),(c) shows logarithm power spectrum and amplitude cepstrum of the time series, respectively.

첫 번째 피크(1.25msec)로 나타났으며, 두 번째 피크는 주기적인 임펄스 신호의 고조파(harmonics) 성분이다.

수치계산으로 주기적인 임펄스 신호의 간격(1.25msec)에 의한 대수 스펙트럼의 주파수 간격(0.8Hz)은 역 푸리에 변환을 통한 진폭 캡스트럼에서 우세 피크로 나타나며 이것은 모의신호의 간격 곧, 산란체 간격으로 해석 가능함을 파악하였다.

4. 실험 및 분석결과

4.1 실험방법

3장의 수치계산으로 검증된 알고리즘을 실제 신호에 적용하고자 다음과 같은 실험을 수행하였다.

외경 16mm, 내경 12mm, 길이 1m의 공기로 채워진 PVC(Polyvinyl-chloride)실린더를 0.1m 간격으로 일정하게 가로 11행, 세로 9열을 배열한 체적을 형성하였다(Arrayed Cylindrical Tube : ACT).

음향수조(5m×5m×5m)내에 ACT를 그림 2와 같이 배치시켜 후방산란 신호를 획득하였다. 사용한 음원은 중심 주파수가 126kHz인 정현파 신호이며, 총 8가지 펄스 길이(0.008ms, 0.012ms, 0.02ms, 0.04ms, 0.08ms, 0.16ms, 0.3ms, 0.6ms)로 ACT 중심을 향하여 수직으로 입사 시켜 1.5초 간격으로 각각 50번씩 반복 송신하였다.

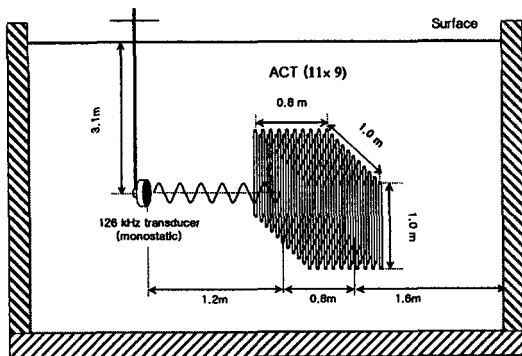


Fig. 2. Experimental Setup.

수신신호는 500kHz로 샘플링하여 앙상블 평균(ensemble average)을 취한 후 분석하였다. 실험 당시 수조 내의 환경으로 수온은 6.8도, 음속은 1434m/s였다.

4.2 분석결과

수조 실험으로 획득한 다양한 펄스길이에 따른 후방산란 신호(그림 3)에 시스템에 의한 영향 및 잡음성분을 줄이기 위해 대역폭 필터(band-pass filter)를 통과한 후, 힐버트 변환으로 신호의 포락(envelope)을 취하였다.

위의 전처리 과정(pre-processing)을 거친 수신신호의 캡스트럼 분석결과 산란체 간격 이상의 펄스길이(0.08msec, 0.16msec, 0.3msec, 0.6msec)에서는 산란

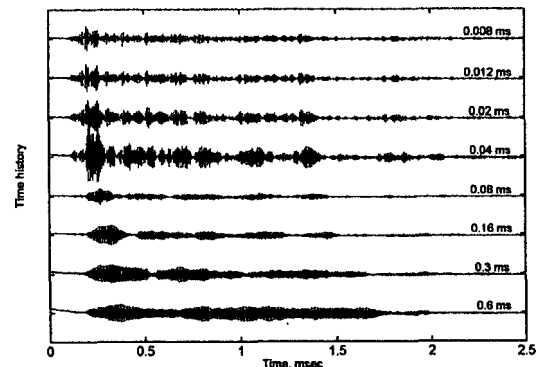


Fig. 3. Time series of received signal for various pulse length.

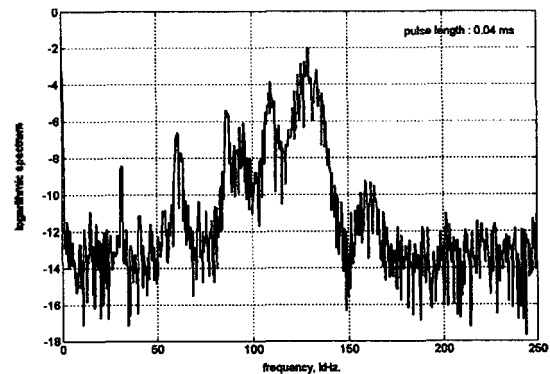


Fig. 4. The Logarithm Power Spectrum of back-scattered signal from the ACT.

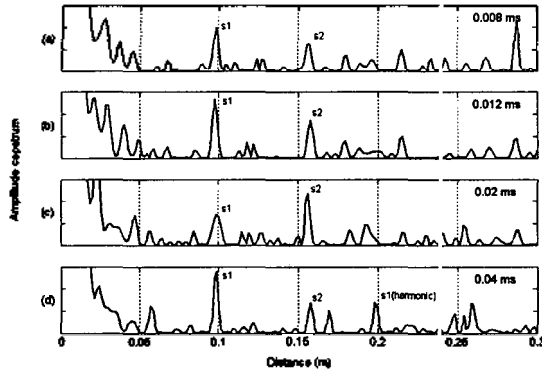


Fig. 5. Amplitude cepstral peaks of backscattered signal from the ACT.

체 간격 추정에 실패했으나 상대적으로 짧은 펄스 길이 (0.008msec, 0.012msec, 0.02msec, 0.04msec)에서의 캡스트럼 피크를 이용한 산란체 간격 추정이 가능했고, 그 결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 S1은 ACT 산란체 간격 0.1m를 나타내는 캡스트럼 피크이다. S2의 피크는 센서의 부엽(side lobe)에 의한 ACT 배열의 사선 거리(slant range)로 추측할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 음향수조 내에 일정한 간격으로 배열된 단순 모양의 산란체들로부터 획득된 후방산란 신호를 분석하여 산란체 간격(scatterer spacing)을 추정하는 방법을 연구하였다. 수치 계산으로 주기적인 임펄스 신호의 간격에 의한 대수 스펙트럼의 주파수 간격은 역 푸리에 변환을 통한 진폭 캡스트럼에서 두세 피크로 나타나며 이것은 모의신호의 간격 곧, 산란체 간격으로 해석 가능함을 파악하였다. 수조 실험으로 다양한 펄스 길이에 따른 후방산란 신호를 분석한 결과, 분포된 산란체 간격 이상의 펄스길이에 대한 수신 신호에서는 캡스트럼 피크를 이용한 산란체 간격 추정은 실패하였으나, 그 이하의 펄스길이의 후방산란 신호로부터는 산란체 간격 추정이 가능함을 확인하였다.

- [1] T. Varghese and K. D. Donohue, "Mean-scatterer spacing estimates with spectral correlation," J. Acoust. Soc. Am. 96(6), 3504-3515, 1994.
- [2] L. L. Fellingham and P. G. Sommer, "Ultrasonic characterization of tissue structure in the *in vivo* human liver and spleen," IEEE Trans. Sonics Ultrason. SU-31, 418-428, 1984.
- [3] R. Kuc, K. Haghkerder and M. O'Donnel, "Presence of cepstral peaks in random reflected ultrasound signal," Ultrason. Imag. 8, 196-212, 1986.
- [4] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, "Digital Signal Processin.," Englewood Cliffs(NJ), Prentice-Hall, 1975.
- [5] R. B. Randall and Jens Hee, "Cepstrum Analysis," B&K Technical Review, No. 3, 1981.
- [6] 국방과학연구소, "다중신호가 중첩된 환경 소음원 식별 기법 연구," 1997.