

가중 처프 신호를 사용한 초음파 고조파 영상 기법의 실험적 고찰

김동열, 이종철, 송태경
서강대학교 전자공학과

전화 : 02-707-3007 / 핸드폰 : 016-210-8623

Experimental Study of Second Harmonic Ultrasound imaging with a Weighted Chirp Signal

Dong Yeul Kim, Jong Chul Lee, Tai Kyung Song
Dept. of Electronic Engineering, Sogang University
E-mail : dancom1@netsgo.com

Abstract

In this paper, a new harmonic imaging technique is proposed and evaluated experimentally. In the proposed method, a weighted chirp signal with a hanning window is transmitted. The RF samples obtained on each array element are individually compressed by correlating with the reference signal defined as the 2nd harmonic ($2f_0$) component of a transmitted chirp signal generated in a square-law system. The proposed method uses the compressed $2f_0$ component to form an image, for which the crosscorrelation term with f_0 component should be suppressed below at least -50dB . After experiment, the 6dB pulse width and peak sidelobe level of the compressed $2f_0$ component were $0.7\mu\text{s}$ and -60dB , respectively. This result shows that the proposed method can successfully eliminate the f_0 component with a single transmit-receive event and therefore is more efficient than the conventional pulse inversion (PI) method in terms of frame rate. We also observed that the 2nd harmonic component starts to decrease for source pressure higher than 210kPa in water, which implies that SNR of the 2nd harmonic imaging using short pulses cannot be increased beyond a certain limit.

I. 서론

초음파 고조파 영상은 수신된 신호로부터 기본주파수 성분을 제거하고 고조파 성분을 이용해서 영상을 구성하는 방식이다.[4] 따라서 수신 신호에서의 효과적인 기본주파수 성분의 제거와 고조파 성분의 추출이 중요하다. 또한 고조파 성분의 발생과 관련된 매질의 비선형 특성에 대한 해석을 할 수 있는 정확한 방법이 필요하다.

매질 내에서 충분히 높은 음압으로 송신된 초음파의 진행은 실제로 회절, 감쇠 등의 여러 비선형 특성으로 인하여 왜곡되고 변이되며, 일반적으로 Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) 방정식의 제한 차이

해법의 수식적인 근사화로 표현할 수 있다.[1-5]

본 논문에서는 기존의 고조파 영상 기법에 송신 신호로서 부호화 된 긴 신호를 사용하는 펄스 압축 기법을 적용한 방식을 제안하였다. 부호화 된 긴 신호로서 가중 처프 신호를 사용하며, 이를 고조파 영상 기법에 적용하고 그로 인해 얻을 수 있는 장점을 KZK 방정식의 해법에 의한 비선형 특성의 연구와 모의 실험 및 실제 실험 결과로써 검증하였다. 제안된 시스템의 고조파 제어기는 수신된 신호를 송신 가중 처프 신호의 중심주파수 f_0 와 $2f_0$ 성분의 상관 계수를 가지는 상관기에 전달하여 선택적으로 각각의 주파수 성분에 대한 펄스 압축을 수행하도록 하여 영상을 구현한다. 제안된 시스템은 신호 대 잡음비가 향상되고 기존방법에서의 대역 혹은 고역 필터를 사용하지 않고 프레임 율의 저하 없이 고조파 영상을 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한 매질 내에서의 비선형 특성에 대한 연구를 바탕으로 실제적인 고조파 성분의 생성정도를 제시하고 기존 고조파 영상 기법과 비교하여 낮은 진압으로 송신 신호의 시간적인 길이를 조절함으로써 더 효과적인 고조파 영상을 구현할 수 있음을 확인하였다.

II. 매질의 비선형 특성

고조파 성분은 인체 내부와 같은 비선형적인 매질의 특성 때문에 발생된다. 다음의 KZK 방정식의 해는 이러한 매질 내에서의 비선형 특성, 회절, 감쇠 등을 잘 표현한다. 식 (1)에서 p 는 음압, z 는 초음파 진행 방향으로의 축을 나타내고 r 은 이와 직교하는 반지름 축이다. $t = t - z/c_0$ 은 지연시간을 나타내고 c_0 은 초음파의 속도를, δ, β, ρ_0 는 각각 확산도, 비선형 상수, 매질의 밀도를 나타낸다. 일반적으로 제한된 진폭을 가지는 음파의 진행은 방정식의 시간 축

해법으로 표현된다.[1,5]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t} = \frac{c_0}{2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} \quad (1)$$

KZK 방정식으로 해석되는 초음파의 비선형적인 진파중에서 고조파 발생에 대하여 다음과 같이 2차 다항식의 근사로 간단히 표현할 수 있다.[2]

$$r(t) = a_1 s(t) + a_2 s(t)^2 + \dots \quad (2)$$

식 (2)에서 $r(t)$ 는 수신된 신호를 나타내고 $s(t)$ 는 송신 신호를 나타내며 a_1, a_2 는 비선형 상수값들이다. 그림 1은 중심 주파수 3.5MHz, 송신 음압 175kPa(p_0)의 기존 펄스 신호와 제안된 시스템에서 송신신호로서 사용된 가중 쳐프 신호의 물 속에서의 왜곡되는 모습을 KZK 방정식을 이용하여 모의 실험한 결과이다.

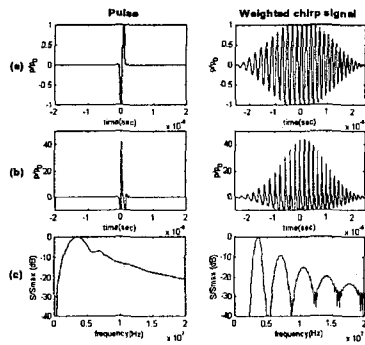


그림 1. KZK 방정식에 의한 신호의 왜곡
(a) 송신신호
(b) 초점거리 63mm에서의 왜곡된 신호
(c) 왜곡된 신호의 스펙트럼

모의 실험 결과, 매질을 통과하면서 송신 신호는 매질의 비선형 특성 때문에 왜곡되고 있음을 확인하였고, 중심주파수 f_0 에 대해 $2f_0$ 에서 제 2고조파 성분이 발생되고 있음을 확인하였다.

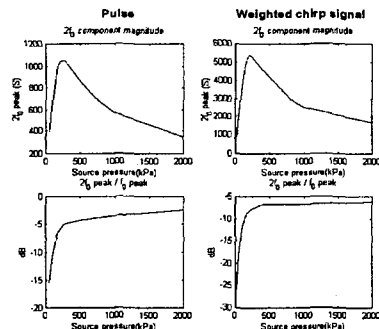


그림 2. 초점거리에서의 제 2고조파 포화현상(물)

다음으로 송신 음압에 대한 매질 내에서의 고조파 성분의 생성정도를 조사하였다. 그림 2는 물 속에서의 송신 음압에 대한 제 2고조파 성분의 스펙트럼크기를 63.5mm의 초점거리에서 조사한 것이다.

기존 펄스와 가중 쳐프 신호 모두 송신 음압을 210kPa 이상 가했을 때 제 2고조파 성분이 더 이상 증가하지 않고 오히려 감소함을 확인하였다. 또한 기본 주파수 성분에 대해서 제 2고조파 성분이 210kPa 이상의 송신 음압에 대해서 포화되고 있음을 확인하였다.[6] 이는 송신 신호의 에너지가 커질수록 많은 에너지가 제 3고조파, 제 4고조파 성분의 생성에 작용하기 때문이다. 물과 달리 인체 내부와 같이 감쇠정도가 심한 매질에서는 이러한 음파의 포화현상이 더 높은 송신 음압에서 발생한다. 조사 결과 인체의 간에 대하여 약 800kPa의 송신음압에서 제 2고조파 성분이 포화되었다.[5,6] 이러한 고조파의 포화 현상은 초음파 고조파 영상에 있어서 송신 신호의 전압을 키워 고조파 성분의 파워를 높이는 것이 한계가 있음을 의미한다.

그림 3는 기존의 짧은 펄스의 시간적인 길이를 1로 했을 때 가중 쳐프 신호의 시간적인 길이에 대해서 초점거리에서의 제 2고조파 성분의 생성정도를 조사한 것이다. 조사 결과 제 2고조파 성분은 송신 신호의 시간적인 길이에 비례하여 증가하고 있음을 확인하였다. 결과적으로 고조파 영상에 있어서 고조파 성분의 파워는 송신 전압을 높이지 않고 송신 신호의 시간적인 길이를 조절함으로써 임의로 조절될 수 있다.

III. 가중 쳐프 신호를 사용한 초음파 고조파 영상 시스템

기존의 고조파 영상 기법 중 대역 또는 고역 필터를 사용하는 방법은 고조파 성분이 주파수영역에서 기본 주파수 대역에 중첩되어 나타날 경우 상당부분 같이 제거되는 단점이 있다. 또한 펄스 반전 방식은 효과적으로 기본 주파수 성분을 제거하는 장점을 가지고 있으나 프레임율이 떨어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 알려진 펄스 압축 기법을 적용하여 송신 신호로서 가중 쳐프 신호를 사용하는 새로운 고조파 영상 기법을 제안하였다.

가중 쳐프 신호는 기존의 쳐프 신호(선형 FM)의 포락선을 해닝 창 함수를 이용해 변형시켜 펄스 압축 후 측정 레벨을 50dB이하로 낮춘 신호이다.[3]

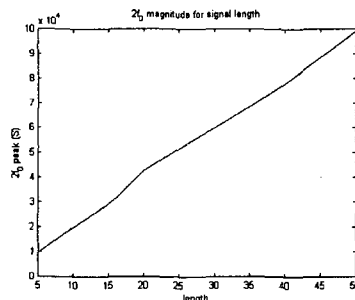


그림 3. 가중 쳐프 신호의 시간적 길이에 따른 제 2고조파 성분의 스펙트럼 크기

가중 처프 신호를 사용한 초음파 고조파 영상 기법의 실험적 고찰

$$s(t) = w_1(t)e^{j(\omega_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} \quad (3)$$

$w_1(t)$ 는 송신 신호의 창 함수를, ω_0 는 중심주파수를 나타낸다. $\mu(= \Delta\omega/\Delta t)$ 는 시간에 따른 주파수의 변화율을 나타낸다. 가중 처프 신호를 식 (2)의 비 선형 시스템에 적용하여 얻은 수신 신호는 아래와 같다.

$$r(t) = a_1 w_1(t)e^{j(\omega_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} + a_2 w_1^2(t)e^{j(2\omega_0 t + \mu t^2)} \quad (4)$$

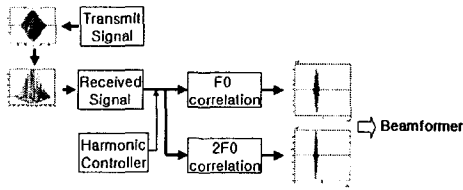


그림 4. 제안된 초음파 고조파 영상 시스템

그림 4는 제안된 초음파 고조파 영상 시스템의 블록도이다. 제안된 시스템의 고조파 제거는 수신된 신호를 송신 가중 처프 신호의 f_0 와 $2f_0$ 성분을 상관계수로 가지는 상관기에 전달하여 선택적으로 각각의 주파수 성분에 대한 펄스 압축을 수행하도록 한다. 고조파 영상 구현을 위한 $2f_0$ 성분의 상관계수를 가지는 상관기의 임펄스 응답함수 $h(t)$ 는 다음과 같다.

$$h(t) = w_2(t)e^{j(2\omega_0 t + \mu t^2)} \quad (5)$$

또한 수신 신호가 위의 $2f_0$ 상관기를 통과하여 펄스 압축된 결과는 다음과 같다.

$$y(t) = a_2 e^{j(2\omega_0 t + \mu t^2)} \int_{-\infty}^{\infty} w_1(t+\tau)w_2(\tau)e^{-j2\mu\tau} d\tau + c(t) \quad (6)$$

여기서 $c(t)$ 는 수신신호의 기본 주파수 성분을 $h(t)$ 와 컨볼루션한 결과로서 처프 신호의 특성상 무시할 만큼 작다.

III. 실험 및 고찰

실제 매질 내에서의 초음파의 진행과 기존의 고조파 영상 기법과 제안된 시스템의 성능 비교를 위한 실험을 수행하였다. 실험 장치에 대한 블록도를 그림 5에 나타내었다.

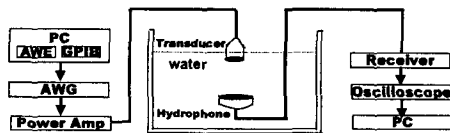


그림 5. 실험 장치 블록도

PC에서 임의 파형 편집기(AWE)에 의해 만들어진 파

형은 GPIB 보드를 통해 임의 파형 발생기(AWG)로 전달되어 전기적 신호로 변환된다. 이는 주문 제작한 Panametrics(part no. : V380)의 3.5MHz 원형 디스크 변환자를 구동시키기 위하여 선형 파워 증폭기를 통하여 증폭되고 변환자에 전달되어 초음파를 발생시킨다. 물 속을 통과한 초음파 신호는 하이드로폰에 의하여 전기적 신호로 변환되어 오실로스코프에 전달되고 다시 PC에서 저장된다.

중심 주파수 3.5MHz, $\Delta\omega/\omega_0=0.6$ 인 가중 처프 신호를 실제로 변환자에 253V의 침투전압을 인가하여 175kPa의 음압으로 물 속에서 송신하였다. 초점거리 63.5mm에서 하이드로폰으로 수신한 신호를 그림 6에 나타내었다. 실험 결과, KZK 방정식에 의해 해석된 가중 처프 신호의 왜곡은 실제 실험에 의한 결과와 잘 부합하고 있음을 확인하였다. 또한 중심주파수 f_0 에 대해서 $2f_0, 3f_0$...에서 고조파 성분이 발생하고 있음을 확인하였다.

그림 7에 기존의 고조파 영상기법과 제안된 시스템의 성능을 비교하기 위한 실험 과정을 나타내었다.

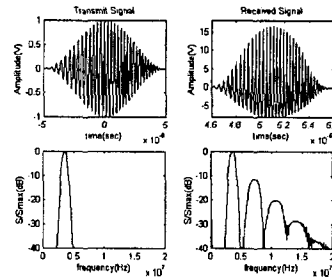


그림 6. 가중 처프 신호의 송신 실험 결과.

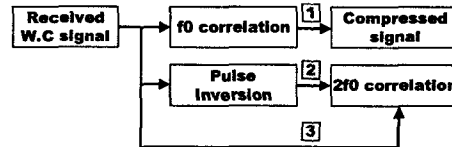
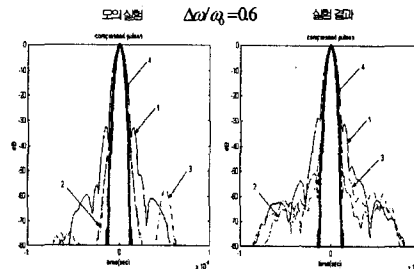


그림 7. 가중 처프 신호를 사용한 여러 고조파 영상 기법

위의 여러 기법에 따른 펄스 압축된 출력 신호의 결과는 다음과 같다.



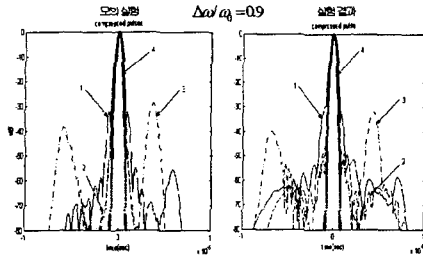


그림 8. 가중 처프 신호를 사용한 여러 고조파 영상 기법의 펄스 압축 결과

그림에서 4는 기본 주파수 성분이 완전히 배제된 고조파 성분만의 자기 상관 결과로서 이상적인 고조파 펄스 압축 결과이다. 모의 실험 및 실제 실험 결과, 기본 주파수 대역과 고조파 대역이 많이 겹치는 경우 ($\Delta\omega/\omega_0=0.9$), 제안된 기법에 의한 펄스 압축 출력의 측엽레벨이 거의 -30dB 까지 올라감을 확인 할 수 있다. 그러나 대역이 많이 겹치는 경우도 펄스 반전 방식은 우수한 측엽값을 보이고 있음을 확인하였다. 두 대역이 많이 겹치지 않는 경우에는 측엽값이 의료 영상을 구현하기 위해 충분한 -60dB 까지 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 대역이 많이 겹치는 경우 $2f_0$ 상관계수와 기본 주파수 성분과의 교차 상관항 값이 커지기 때문이다. 따라서 제안된 시스템의 송신 가중 처프 신호의 대역을 적절히 조절하면 펄스 반전 방식에서의 프레임 울의 저하 없이 충분히 우수한 측엽레벨을 가지는 펄스 압축 결과를 얻을 수 있다.

IV. 결론

제안된 고조파 영상 기법에 의한 시스템은 가중 처프 신호를 사용하여 신호 대 잡음비가 향상되었으며, 필터를 사용하지 않고 프레임 울의 저하없이 효과적으로 고조파 영상을 구현할 수 있다. 이를 KZK방정식의 제한 차이 해법에 의한 모의 실험과 실제 실험으로 확인하였다. 또한 실제 매질에서의 고조파 생성정도를 조사한 결과, 약 210kPa 이상의 송신 음압에서 제 2고조파 성분이 더 이상 발생하지 않고 포화됨을 확인하였다. 이는 송신 전압을 높여서 고조파 성분의 파워를 증가시키는 것에 한계가 있음을 뜻한다. 그러나 제 2고조파 성분은 송신 신호의 시간적인 길이에 비례하여 증가하여 생성되었다. 따라서 제안된 시스템은 송신신호인 가중 처프 신호의 시간적인 길이를 조절하여 낮은 전압으로 효과적으로 고조파 성분의 파워를 증가시킬 수 있다.

참고문헌

- [1] Y.S. Lee and M.F. Hamilton, "Time-domain modeling of pulsed finite-amplitude sound beams," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, pp. 906-917(1995)
- [2] T. Christopher, "Finite amplitude distortion based inhomogeneous pulse echo ultrasonic imaging", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., Vol. 44, no. 1, pp 125-139, pp. 125-139, 1997
- [3] 정영관 외, "가중 처프 신호를 이용한 펄스 압축 방식의 초음파 영상 시스템" 2000년도 대한 의용 생체 공학회 춘계 학술대회 제출.
- [4] S.Krishnan, J.D.Hamilton, and M.O'Donnell, "Suppression of Propagating Second Harmonic in Non-Linear Imaging", 1997 IEEE Ultrasonics Symposium
- [5] Michalakis A. Averkiou, David N. Roundhill, and Jeffrey E. Powers, "A New Imaging Technique on the Nonlinear Properties of Tissue" IEEE Ultrasonics Symposium(1997)
- [6] Don A. Webster and David T. Blackstock, "Finite-amplitude saturation of plane sound waves in air" J. Acoust. Soc. Am. Vol 62, No.3 September 1977