

초음파 영상 시스템에서 합성 집속을 위한 새로운 구면파 발생 방법

안영복

건국대학교 전자공학과

New Circular Wave Generation Method for Synthetic Focusing in Ultrasonic Imaging Systems

Young Bok Ahn

Dept. of Electronic Engineering, Konkuk University
(Received October 9, 2007. Accepted October 22, 2007)

Abstract

The synthetic focusing in the ultrasonic imaging systems has been formed in the way that one element transmits a circular wave and receives an echo signal. The amplitude of the signal transmitted from one element is too small to propagate a long distance so that the SNR(Signal to Noise Ratio) is very low in an image obtained by the synthetic focusing. To solve this problem, a defocusing method which uses several elements has been proposed. In this method, the SNR is improved due to using several elements to transmit the circular wave. But if the number of transmitting elements increases, the phase distortion is severe in the defocusing method. In this paper, we propose a new method that can generate a circular wave using a lot of elements without phase distortion. At first, we generate limited plane waves with different propagation angles and then superpose them to make a circular wave. We show that the circular wave can be used to improve SNR in the real-time 3D ultrasonic imaging as well as the synthetic focusing through computer simulation and experiments.

Key words : ultrasound, synthetic focusing, circular wave, phase distortion

1. 서론

비파괴 검사에서 시작된 기존의 합성 집속은 한 개의 소자에서 송신하고 한 개의 소자가 수신하는 방식으로 해서 영상을 얻기 때문에 신호의 크기가 작고 SNR이 낮다[1]-[5]. 합성집속에서 송신파로 사용하는 구면파는 일정 반지름 상에서 위상과 크기가 균일해야 한다. 균일한 위상은 빔을 집속할 때 시간지연을 정확하게 하며 신호의 균일한 크기는 한 번의 송신에서 큰 에너지를 송신할 수 있게 한다. 즉 하드웨어에서 각 소자에서 송신할 수 있는 신호의 크기는 제한되어 있으므로, 한 번에 송신할 수 있는 에너지의 전체 크기는 송신빔의 가장 큰 부분에 의해 제한을 받게 된다. 따라서 송신빔의 에너지가 한 곳에 집중되면 한 번에 송신할 수 있는 전체 에너지 양은 작아지게 된다. 따라서 그림 1에서처럼 전 방향으로 균일한 에너지 분포를 가질 경우 한번에 송신할 수 있는 총

에너지의 양은 증가하게 된다. SNR의 개선을 위해 다중 소자를 사용하는 방법으로 역 초점화(defocusing) 방법이 개발되었다[6]. 즉 각각의 소자에서 나오는 구면파들을 역 초점화 시키는 방향으로 시간지연을 주어 중첩시킴으로써 한 개의 소자에서 나오는 구면파와 같이 만드는 것이다. 그러나 이 방법은 소자의 수가 증가함에 따라 위상의 왜곡이 발생하게 되고 이는 빔 집속 시에 해상도를 저하시키는 원인이 된다.

본 논문에서는 소자의 수를 증가시키면서 동심원상에서 위상의 왜곡이 없는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 기존의 역 초점화 방법은 구면파의 중첩으로 구면파를 만드는 것에 비해 이 논문에서 제시하는 방안은 평면파들의 중첩으로 구면파를 만든다. 먼저 여러 개의 소자에서 나오는 제한된 평면파들을 각도를 달리하여 중첩시킴으로써 구면파를 발생시키는 과정을 설명하고, 새로운 구면파의 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 역 초점화 방법에 의해 얻어진 구면파와 특성을 비교하고자 한다. 또한 기존의 역 초점화 방법을 이용해서 얻은 합성 집속 영상, 일반적인 B-mode 영상 그리

Corresponding Author : 안영복
서울시 광진구 모진동 93-1 건국대학교 전자공학과, 143-701
Tel : 02-450-3071 / Fax : 02-2025-2299
E-mail : ybahn@konkuk.ac.kr

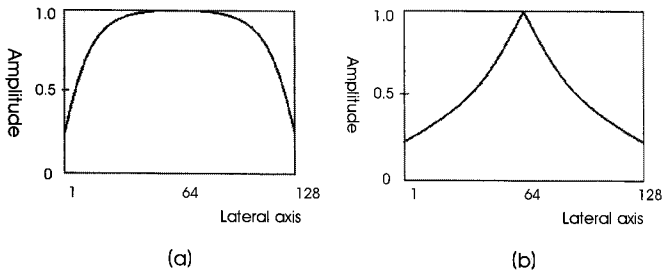


그림 1. 측 방향의 에너지 분포 (a) 에너지 분포가 균일한 경우, (b) 에너지 분포 한곳에 집중된 경우
Fig. 1. Energy distribution of lateral diirection (a) distribution of energy : uniform, (b) distribution of energy : concentrated at an area

고 제안된 방법으로부터 얻은 구면파를 이용한 합성 집중 영상을 실험을 통해 비교한다.

II. 제한된 평면파의 생성

폭이 작은 소자에서 나오는 초음파는 구면파에 가까운 모양을 가지게 된다[7]. 각각의 소자에서 나오는 구면파를 중첩 시켜서 그림 2에서와 같은 제한된 평면파를 만든다. 그림 2에서 각각의 반원은 각 소자에서 나오는 구면파에 가까운 파형을 나타내며 이 구면파들이 중첩되어 제한된 평면파를 만들게 된다. 그림 3은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구면파를 중첩하여 평면파를 얻은 것이다. 시뮬레이션 사양에서 사용된 소자 갯수는 64개이고, 회전각도 (steering angle)은 18°이다. 변환자의 Major Pitch는 0.2 mm이고, Minor Pitch는 0.02 mm이고 중심주파수는 3.5Mhz이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 각 소자에서 나오는 구면파를 중첩 시켜서 만든 평면파는 한정된 길이에서만 평면파와 같은 특성을 나타내기 때문에 이를 제한된 평면파라고 할 수 있다.

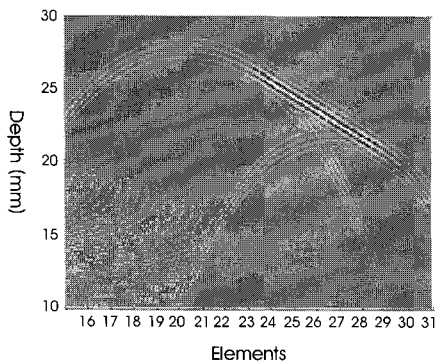


그림 3. 컴퓨터 시뮬레이션에 의 얻어진 제한된 평면파의 빔 패턴(소자 개수 : 64개, 회전각도 : 18°, 중심 주파수 : 3.5 Mhz)
Fig. 3. Beam pattern of a limited plane wave obtained by computer simulation (no. of elements : 64, steering angle : 18°, center frequency : 3.5Mhz).

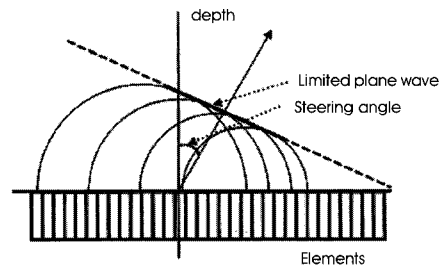


그림 2. 각 소자로부터 나오는 구면파의 중첩에 의해 얻어진 제한된 평면파
Fig. 2. Limited plane wave generated by superposition of circular waves from each element.

제한된 평면파들을 여러 각도로 달리하여 중첩 시켜서 구면파를 만드는 개념을 그림 4에 나타내었다. 구면파는 무한개의 평면파의 중첩으로 표현될 수 있는데 이 것을 각 분해(angular decomposition)라 한다[8]. 따라서 진행 각도가 다른 무한개의 평면파를 동시에 송신했을 때 이들 평면파들이 공간상에서 중첩되어서 생기는 송신빔은 구면파의 모양을 가지게 됨을 알 수 있다. 이 각 분해를 직접 적용하면 어레이의 한 소자에 에너지가 집중된다. 이 경우에 각 소자에 가해지는 에너지의 상대적 크기를 비교한다면, 에너지가 집중된 한 소자에서만 음파가 나가는 것과 같이 된다. 에너지가 한 소자만 집중되는 것을 막기 위해 가상 어레이(virtual array)를 사용한다. 모든 평면파가 중첩되어 에너지가 모이는 점을 실제 어레이 축 상에 있는 것이 아니라 실제 어레이의 뒤쪽에 가상적으로 있는 것으로 가정한다. 가상 어레이는 실제로 존재하는 것이 아니라, 그 위치에서 제한된 평면파를 송신할 때 이 것과 등가적인 빔을 실제로 나타낼 수 있다는 것을 의미한다.

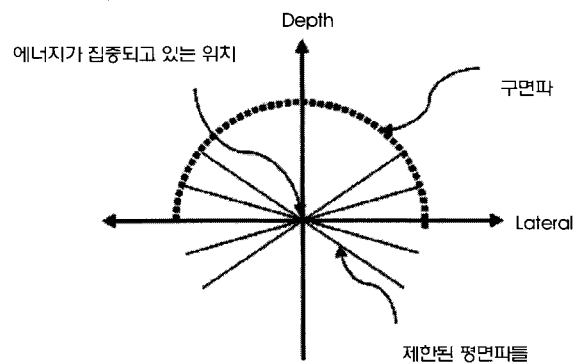


그림 4. 진행 각도가 다른 여러 제한된 평면파들의 중첩으로 얻어진 구면파
Fig. 4. Circular wave generated by superposition of limited plane waves with different propagation angles

III. 새로운 구면파의 특성

그림 5는 새로운 구면파의 송신빔 특성을 보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 극 좌표계로 파형을 얻은 것이다. 이 그림에서 파형이 직선으로 나타나면 위상이 잘 맞는 것을 의미한다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 사용한 변환자의 조건은 그림 3을 얻을 때와 동일하며 가상 어레이의 위치는 실제 어레이로부터 10mm만큼 뒤에 있는 것으로 가정하였다. 한 개의 제한된 평면파를 만들기 위해 17개의 소자를 사용하였고 총 50개의 제한된 평면파가 중첩되었다. 사용한 펄스는 식 (1)처럼 가우시안 포락선을 갖는다.

$$p(t) = \exp(-j(\omega_0/\sigma)^2 t) * \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

여기서 펄스의 폭을 의미하는 σ 는 2.5π 로 하였다. 각각의 소자의 지향성을 식 (2)로 나타내었다[9].

$$A(\theta) = \frac{\sin(\frac{kw}{2} \sin(\theta))}{(\frac{kw}{2} \sin(\theta))} \cdot \cos(\theta) \quad (2)$$

k 는 wave number이고, w 는 소자의 폭을 나타내며, θ 는 빔이 소자에서 진행하는 각도이다. 초음파가 진행함에 따라 퍼져서 약화되는 현상을 식 (3)과 같이 고려하였다.

$$Fall_{off} = \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

여기서 r 은 빔의 진행거리이다.

각각의 소자에서 나오는 파들을 위와 같이 모델링한 후, 모든 파들을 중첩시키면 그림 5와 같은 빔 패턴을 구할 수 있다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 제안된 구면파는 일정 각도 범위 안에서 위상이 잘 맞을 뿐만 아니라 전 각도 범위 안에서 거의 균일한 음파의 세기를 보이고 있다. 이것은 에너지가 전 각도에 걸쳐 거의 균

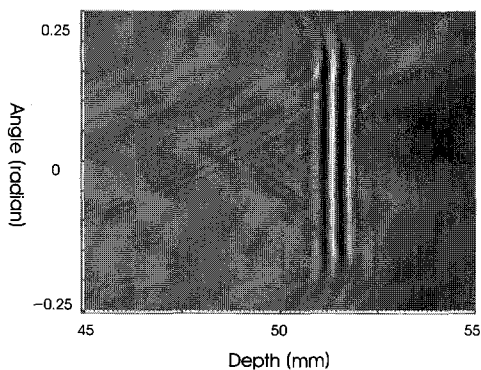


그림 5. 제안된 방법에 의해 생성된 구면파
Fig. 5. Circular wave generated by proposed method

등하게 퍼져 있기 때문에 어레이 전체의 에너지를 증가시킬 수 있음을 나타낸다. 즉 앞에서 특정 소자에 에너지가 집중됨으로 인해 어레이 전체의 에너지가 증가하는데 제한되는 것을 피할 수 있다. 가상 어레이와 실제 어레이 사이의 거리가 멀어질수록 구면파의 방사각은 좁아지고 에너지 집중도는 작아지며, 거리가 가까워질수록 구면파의 방사각은 커지고 어레이상의 에너지의 집중도는 증가된다.

64개의 소자를 이용하여 역 초점화의 방법에 의해 만들어진 구면파와 제안한 구면파의 비교를 위해 그림 6에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 역 초점화에 의해 만들어진 구면파의 송신빔을 극좌표계로 나타내었다. 그림 6에서 역 초점화에 의해 만들어진 구면파의 송신빔은 동심원상에서 위상이 맞지 않음을 알 수 있다.

IV. SNR의 비교

산재 합성집속 구경 빔포밍 알고리즘(sparse synthetic aperture beamforming algorithm)을 적용시키면 구면파 64개의 중첩으로 얻을 수 있는 영상의 해상도를 약 5~8개의 중첩으로도 얻을 수 있다[9]. 64개의 신호로부터 일반적으로 B-mode 영상을 얻는 방식을 이용해서 한 프레임의 영상과 제안한 구면파를 이용해서 단지 5~8번의 신호만을 합성집속하여 얻은 영상에 대해 수식(4)~(7)을 이용해서 각각의 SNR을 비교하였다[6]. 5개의 신호만을 합성집속해서 한 프레임의 영상을 얻을 때 제안한 방법으로 구면파를 만들어 사용하는 경우와 기존에 한 개의 소자에서 송/수신해서 구면파를 만들어 사용하는 경우에 대해 각각 SNR을 구하여 비교하였다. 여기서 64개의 신호를 이용하여 일반적인 방법으로 얻은 기존의 B-mode 영상을 기준으로 사용하였다.

$$SNR(sparse\ synthetic\ aperture) \approx A(n)^{1/2} (N_p N_r)^{1/2} \quad (4)$$

$$SNR(synthetic\ aperture) \approx (N_p N_r)^{1/2} \quad (5)$$

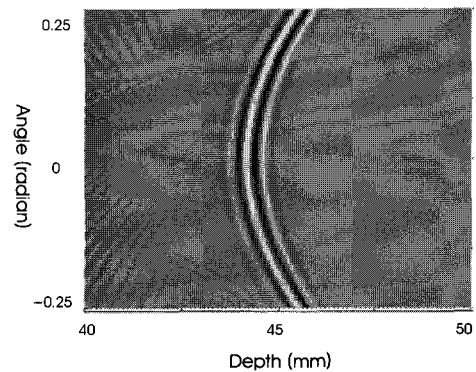


그림 6. 역 초점화에 의해 생성된 구면파
Fig. 6. Circular wave generated by defocusing

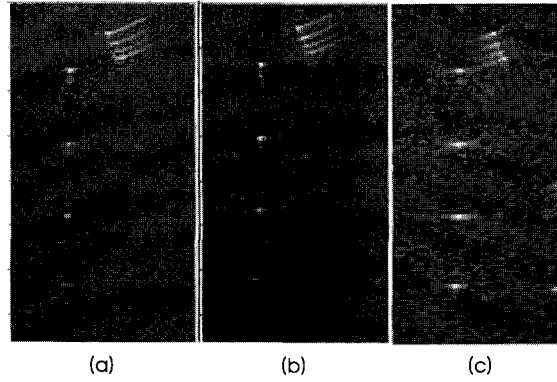


그림 7. (a) 역 초점화 (b) 제안된 구면파 (c) 기존의 빔포밍 방법에 의해 얻어진 실험 영상
 Fig. 7. Experimental images obtained by (a) defocusing (b) proposed circular wave (c) conventional beamforming methods.

$$SNR(\text{conventional system}) \approx N_t (N_t^{1/2}) / 20 \log[SNR(\text{sparse synthetic aperture}) / SNR(\text{conventional})] \quad (6)$$

$$= 20 \log[(1/N_t^{1/2}) (N_p^{1/2})] \quad (7)$$

여기서 N_p 는 구면파를 송신한 횟수, N_r 는 수신하는데 사용된 소자의 수, A 는 송신시 신호의 크기가 보통의 경우보다 몇 배 증가 했는가를 나타낸다. 그리고 n 은 구면파를 만드는데 사용되어진 소자의 수, N_t 는 기존 빔포밍 방법에서 송신하는데 사용되어진 소자의 수를 나타낸다.

제안된 구면파 발생 방법에서 $N_p = 5$, $N_r = 64$, $N_t = 64$, $A = 1$, $n = 64$ 일 경우의 SNR은

$$20 \log[SNR(\text{sparse synthetic aperture}) / SNR(\text{conventional})] \approx - 4.1 \text{ dB} \quad (8)$$

기존의 구면파 발생 방법에서 $N_p = 64$, $N_r = 64$, $N_t = 64$, $A = 1$, $n = 1$ 일 경우의 SNR은

$$20 \log[SNR(\text{sparse synthetic aperture}) / SNR(\text{conventional})] \approx - 18.1 \text{ dB} \quad (9)$$

위의 계산에서 보는 바와 같이 제안된 구면파를 사용할 경우 기존의 한 소자가 송신하고 한 소자가 수신하는 경우보다 SNR이 크게 향상됨을 알 수 있다. 또 역 초점화의 방법을 사용할 경우에는 위상의 왜곡으로 인해 소자의 수를 늘리는데 제한이 있으므로 본 논문에서 제시한 방안이 매우 높은 SNR을 가짐을 알 수 있다.

V. 실험

소자간의 간격이 0.22mm이고, 총 소자수가 128개인 위상 어레이(phased array) 프로브를 이용해서 그림 7과 같이 영상을 얻었

다. 본 논문에서 제안된 구면파 발생 방법에 의해 얻어진 구면파 5 개를 중첩하여 영상을 얻었으며, 같은 조건으로 역 초점화 방법에 의해서도 영상을 얻었다. 또한 기존의 빔 집속 방법으로 64개의 신호를 수신하여 B-mode 영상을 얻었으며 이 영상을 기준 영상으로 하여 SNR을 비교한다. 제안된 방법에 의해 얻어진 영상은 기존 방법에 의해 얻은 영상보다 더 나은 해상도를 가짐을 알 수 있고 SNR에 있어서는 예측한대로 기존 영상보다는 조금 떨어지는 것을 알 수 있다.

제안된 방법과 역 초점화의 방법에 의해 얻어진 영상을 비교할 때 식 (7)에 의해 N_p , N_r , N_t 값이 일정할 경우에 역 초점화에 의해 얻어진 영상과 본 논문에서 제시한 방법에 의해 얻어진 영상과의 SNR 차이가 없으나 역 초점화를 이용한 경우에는 구면파의 크기가 불균일하여 제안된 방법에 비해 SNR이 떨어질 것으로 예측되었다. 또한 해상도에서도 역 초점화 방법은 역 초점화를 이용해서 얻은 구면파의 위상 왜곡으로 인해 제안된 방법에 의해 얻어진 영상보다 좋지 않을 것으로 예측되었다. 그림 7에서 보면 제안된 방법의 SNR과 해상도가 역초점화 방법에 비해 약간 향상되었으나 예상보다 큰 차이가 나지 않았다. 이것은 점 타겟(point target) 들이 위상 어레이의 중앙에 위치해 있어 위상의 왜곡에 크게 영향 받지 않기 때문이다. 만약 우리가 선형어레이를 이용해서 데이터를 얻으면 우리가 예측한 차이를 볼 수 있으나 현재의 데이터는 위상어레이를 이용해서 얻었기 때문에 이러한 차이가 크지 않다.

VI. 결론

본 논문에서 제시한 구면파의 FOV(Field Of View)는 60° 정도로써 단일 소자를 사용하는 경우에 비해 약간은 좁아지나 3 차원 영상 응용에 충분히 이용할 수 있다. 또 역 초점화에 의해 얻어진 영상이 제안된 방법에 의해 얻어진 영상과 같은 정도의 해상도를 가지기 위해서는 소자의 수가 작아야 하기 때문에 제안된 방법에 비해 SNR이 떨어짐을 알 수 있다. 위에서 계산된 SNR 결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제시한 구면파 발생 방법은 송신 소자의

수를 얼마든지 늘릴 수 있기 때문에 SNR을 크게 개선시킬 수 있다. 제안된 방법을 합성집속에 이용하면 10개 이하의 빔을 이용하여 높은 SNR을 유지하면서 영상을 얻을 수 있기 때문에 실시간 3차원 영상을 얻는데 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] L. J. Busse, H. D. Collins, and S. R. Doctor, "Review of the development of synthetic aperture focusing technique to ultrasonic testing(SAFT-UT)," *US DOE Report, no. NUREG/CR-3625*, 1984.
- [2] J. R. Frederick, C. J. H. Vandenbroek, R. C. Fairchild, "Improvedultrasonic nondestructive testing of pressure vessels," *US DOE Report, no. NUREG/CR-0135*, 1978.
- [3] D. R. Hamlin, J. L. Jackson. and T. A. Muller, "Program for field validation of the synthetic aperture focusing thechnique for ultrasonic testing(SAFT-UT)," *US DOE Report, no, NUREG/CR-1885*, 1987.
- [4] R. N. Thomson, "Transverse and longitudinal resolution of the synthetic aperture focusing technique," *Ultrasonics*, vol. 23, no. 1, pp9-15, 1984.
- [5] D. K. Peterson and G. S. Kino. " Real-time digital image reconstruciton: A description of imaging hardware and an analysis of quantization errors," *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*. vol. SU-31, no. 4. pp337-351, July 1984.
- [6] M. Karman, p. c. Li and M. ODonnell, "Synthetic aperture imaging for small scale systems," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Ferg. Contr.*, vol.42, pp.429-442, 1995.
- [7] A. Macovski, *Medical Imaging System*, Prentice-Hall, INC., 1983, pp.188.
- [8] Mehrdad Soumerkh, *Fourier Array Imaging*, Prentice Hall, pp.153.
- [9] HECHT, *OPTICS*, Addison-wesley publicing CO. pp393-468.