

초음파 영상에서 제한회절빔을 이용한 송수신 집속의 구현에 관한 연구

A Study on the Realization of Transmit and Receive Focusing Using Limited-Diffraction Beam in Ultrasound Imaging

정 목 근*, 권 성 재*, 안 영 복**

(Mok Kun Jeong*, Sung Jae Kwon*, Young Bok Ahn**)

요 약

초음파 선형트랜스듀서에서 제한회절음장은 영상깊이에서 다른 방향으로 진행하는 평면파들의 선형적인 중첩으로부터 구현한다. 제한회절음장을 구현하기 위한 송수신음장은 영상깊이를 지나가는 평면파들의 공간적인 확장으로부터 구해지는데 실제의 하드웨어로 구현하기 어렵다. 본 논문은 진행방향이 다른 pulsed mode 평면파를 각각 송수신한 후, 얻어진 데이터로부터 합성집속 방법에 의하여 제한회절빔을 구현하였다. 제안한 방법은 모든 송수신소자에서 발생하는 음장의 크기가 동일하므로 송수신전력이 증가하여 신호대잡음비와 명암비를 증가시키며 간단한 하드웨어로 구현이 가능하다. 시뮬레이션 결과는 송신은 한점집속, 수신은 동적집속을 사용하는 기존의 방법과 비교하여 주엽(mainlobe)의 폭과 부엽(sidelobe)의 크기 관점에서 우수함을 증명하였다.

ABSTRACT

Limited-diffraction beam in linear array transducer is a superposition of plane waves traveling in different directions along the imaging depth. Source distribution is obtained by spatially extending the synthesized plane waves, which requires complicated hardware for realization. In order to overcome this disadvantage while achieving the same field response, a method is proposed in this paper wherein limited-diffraction beams are synthesized in the temporal domain through signal processing. This method is advantageous over the conventional focusing one in that the former reduces the amount of hardware required, is capable of achieving higher transmit power, and increases the SNR and contrast of image. From simulation results, we can clearly observe its superiority to the conventional one-point transmit, continuous dynamic receive focusing in terms of mainlobe width and sidelobe level.

1. 서 론

초음파 의용 영상의 최대 단점은 해상도가 낮다는 점이다. 이를 보완하기 위하여 감쇠계수, 비선형계수, 탄성계수 등의 조직 파라메타의 영상화와 도플러를 이용한 혈류 속도측정 등에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 이러한 영상은 초음파 음장이 인체를 진행할 때 인체의 장기에서 반사된 초음파 신호의 통계적 특성을 영상화하는 것인데 문제는 초음파 음장이 회절에 의하여 퍼짐으로 인하여 음장의 통계적 특성이 깊이에 따라 달라지므로 측정 정밀도가 크게 영향을 받는 것이다. 따라서 초음파 음장이 인체 내를 진행함에 따라 음장이 영상 깊이까지 회절하지 않고 필요한, 혹은 균일한 축방향 해상도를 유지하도록 하는 것은 중요한 문제이다. 초음파 영상에

서는 Durnin[1]에 의하여 애널리 어레이를 이용한 비회절(non-diffraction)빔 집속의 최초의 이론적인 연구 결과가 제시되었고, 이를 확장하여 Lu[2] 등이 유한 크기의 애널리 어레이를 이용하여 유한 깊이까지 회절 현상이 적은 제한 회절(limited-diffraction)음장을 실제 구현할 수 있음을 보였다. 애널리 어레이를 이용한 제한 회절 빔의 음장 특성은 Bessel 함수의 형태로 나타나며 3차원 음장 집속이 이루어지므로 충분히 깊은 영상 깊이 까지 매우 좋은 축방향 해상도를 갖는다. 최근에 이르러서는 제한회절빔을 송신하여 반사된 신호를 주파수 영역에서 Fourier method를 이용하여 영상을 합성하였고, 선형어레이에서의 실험결과를 발표하였다[3, 4]. 합성된 영상은 한번의 송신으로 모든 영상영역을 합성할 수 있으므로 매우 높은 속도로 영상을 얻을 수 있어 심장과 같이 빨리 움직이는 물체의 영상화에도 응용될 수 있다.

Jeong[5, 6] 등은 널리 사용하는 선형 어레이를 이용하여 제한 회절 특성을 갖는 음장을 합성할 수 있음을 보였

*대전대학교 전자·통신공학부

**전국대학교 전자공학과

접수일자: 1998년 4월 1일

다. 선형 어레이를 이용한 제한회절법은 서로 다른 방향으로 진행하는 평면파의 중첩으로부터 얻어지며, 측방향 음장 특성은 sinc 함수의 형태로 나타난다. 그러나 2차원 음장 집속에 의하므로 애널리 어레이의 경우보다 측방향 해상도가 떨어진다.

선형어레이에서 제한회절법을 구현하기 위해서는 sinc 함수 형태로 합성된 평면파의 음장을 송신하므로 송신 소자마다 송신 빔의 모양이 다르며 어레이의 중심 쪽의 소자에서만 상대적으로 큰 전력이 나타난다[2-6]. 따라서 기존에 사용하는 침속방법에 비하여 송신전력이 작아 SNR이 작으며, 또한 이러한 제한 회절 음장 패턴을 얻기 위해서는 복잡한 실시간 신호처리 하드웨어와 고속 고전압 신행증폭기가 필요하다. 본 논문은 선형어레이를 이용한 제한 회절 음장을 구현하는데 있어서 필요한 음장의 중첩을, 영상 공간상에서 각각 다른 시간에 방사된 송신음장으로부터 신호처리에 의하여 합성하므로 간단한 하드웨어로 큰 송신전력을 얻을 수 있고, 평면파의 진행 방향인 상사각의 제한에 따른 해상도의 지하 문제[6]도 해결할 수 있다.

II. 이 론

초음파 영상에서 트랜스듀서의 모양이 그림 (1)과 같이 1차원 구조를 가질 때, 연속파(continuous wave)인 평면파(plane wave)가 트랜스듀서에 대하여 θ 의 각도를 가지고 진행하면 수식(1)과 같이 표현된다[5].

$$\Phi_{\beta} = e^{-i\omega t} e^{ik_{\beta}x} e^{ik_{\beta}(z - z_f)}, \quad \nu^2 + \beta^2 = 1, \quad \beta = \sin \theta \quad (1)$$

여기서 ω 는 주파수이며 k 는 wave number이다.

그림 (2)에 진행방향이 0과 β 인 두 개의 평면파를 초점 ($z = z_f$)에서 위상이 일치하도록 중첩시켰다. 따라서 이 점에서 두 신호가 서로 더해지므로 가장 큰 전력이 나타나며, 측방향으로 멀어질수록 겹쳐지는 신호의 위상 차가 커지므로 신호의 전력은 떨어진다. 같은 방법으로 $\pm \beta_m$ 의 각도 이내로 진행하는 모든 평면파들을 중첩하면

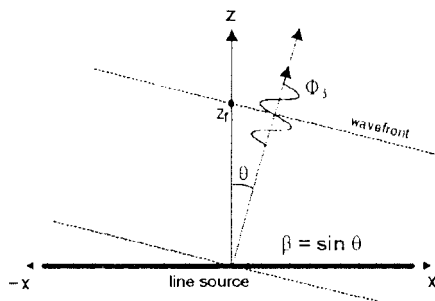


그림 1. θ 의 각도로 진행하는 연속평면파의 모델
Fig. 1 Model of continuous plane wave propagating at angle θ .

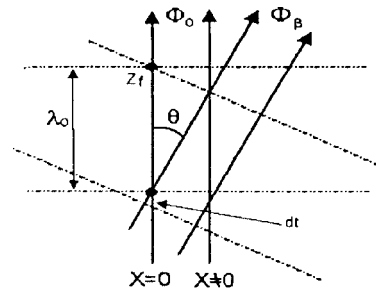


그림 2-a

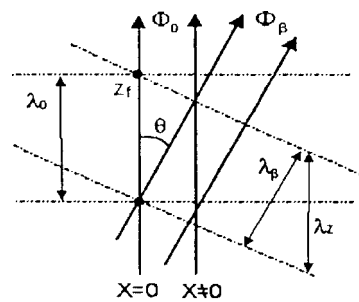


그림 2-b

그림 2. (a) 같은 주파수를 갖고 0도(이점 쇄선)와 θ (일점 쇄선)의 방향으로 진행하는 평면파의 중첩, z_f 는 두 평면파의 위상이 일치하는 깊이. (b) 진행하는 방향에 따라 다른 주파수를 갖는 평면파의 중첩

Fig. 2 (a) Superposition of two plane waves of the same frequency, one propagating at angle of 0 (double dot and dashed line) and the other at θ (single dotted and dashed line) with respect to $z=0$ axis, with z_f being the depth at which phases of both waves coincide. (b) Superposition of two plane waves whose frequencies vary with direction of propagation.

$$\begin{aligned} \Phi(x, z = z_f, t) &= \int_{-\beta_m}^{+\beta_m} \Phi_{\beta} d\beta \\ &= 2\beta_m \operatorname{sinc} \left(\frac{2\beta_m x}{\lambda} \right) \cdot e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 되며 초점에서 측방향 음장특성은 sinc함수로 나타나 mainlobe의 폭은 λ/β_m 이 된다. 그러나 그림(2-a)는 mainlobe가 있는 중심축 상에서 초점을 벗어난 깊이에서는 d 만큼의 위상차가 생겨 신호전력이 떨어진다. 따라서 수식(2)의 음장특성은 음장거리(field of depth) Δz 가

$$\Delta z = \pm \frac{\lambda}{\pi \beta_m^2} \quad (3)$$

거리 이내에서만 유효하다. 음장거리를 넓히기 위하여 그림 (2-b)와 같이 평면파의 진행방향에 따라 파장이 $\omega_{\beta} = \omega_0/\nu$ 의 관계를 가지면 mainlobe가 있는 중심축상의 모든

깊이에서 위상이 정렬되므로, 트랜스듀서가 무한대의 크기를 갖는 이상적인 경우 음장거리도 무한대가 된다[6].

위의 결과는 연속파의 경우로서, 의용 초음파에 적용하기 위해서는 깊이 방향의 해상도를 가져야 한다. pulsed mode로 확장하기 위해 다양한 주파수를 갖는 평면파를 중첩한다. 수식(2)를 아래에서처럼 수식(4)와 같이 주파수 적분하면

$$\Psi(x, z, t) = \int_{BW} F(\omega) \cdot \Phi(x, z, t) d\omega \quad (4)$$

이 되며 pulsed mode의 제한회절범의 특성을 얻을 수 있다. 여기서 BW 는 pulse의 주파수 대역이며 $F(\omega)$ 는 송수신시스템의 주파수 특성이다. 이 결과로부터 트랜스듀서에서의 송신음장원(source distribution) $\Psi(x, z=0, t=0)$ 을 구하면 음장특성과 마찬가지로 sinc함수로 나타나므로 각각의 소자마다 서로 다른 형태의 초음파신호를 발사하여야 한다[5, 6]. 그리고 트랜스듀서의 중심에 있는 소자에 상대적으로 큰 전력이 집중되어 기존의 집속방법에 비하여 전체적으로 적은 전력을 송신하게 된다. 이는 신호의 신호대잡음비(SNR)를 낮추므로 영상의 명암비(contrast)를 저하시킨다. 또한 mainlobe의 폭과 음장거리 사이에는 상반관계가 있으므로 측방향 해상도를 증가시키기 위하여 β_m 을 증가시키면 음장거리가 줄어들게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여, 수식 (4)처럼 적분하지 않고 수식 (5)와 같이 각각의 진행 각도에 대하여 깊이 해상도를 갖는 pulse형태의 평면파 $\Phi_{\beta}(x, z, t)_{\beta}$ 를 따로 송수신하여 저장하고 이 데이터를 합성집속하여 제한회절범을 구현하였다.

$$\Phi_{\beta}(x, z, t)_{\beta} = \Phi_{\beta}(x, z, t) \cdot \exp(-\omega^2 t^2 / \sigma^2) \quad (5)$$

여기서 σ 는 가우시안 펄스의 폭이다. 이러한 송신방법은 pulsed mode 평면파를 발사할 때 각각의 소자에 선형 지연시간만을 가하면 되므로 기존의 한점 집속방법에 비하여 간단한 하드웨어로 구현될 수 있다.

β_0 의 각도로 pulsed mode 평면파를 발사하면 모든 수신소자에서 받은 신호는 임의의 위치에 있는 반사체에서 돌아온 신호의 시간을 기하학적인 거리로부터 구할 수 있다. 따라서 각각 다른 β 값을 갖는 평면파를 발사한 후 반사된 신호를 따로 저장하고, 같은 영상점에서 돌아온 신호를 각각의 진행거리를 계산하여 구한 후 서로 선형적으로 중첩시키면, 서로 중첩한 후에 송신한 음장으로부터 얻은 것과 같은 특성을 갖는 제한회절범이 구현된다. 이러한 방법은 모든 영상깊이에서 구현이 가능하므로 음장거리는 트랜스듀서의 크기가 D 일 때 각각의 평면파가 모두 중첩되는 깊이의 한계인

$$Z_{max} = D/2 \tan(\sin^{-1} \beta_m) \quad (6)$$

까지 확장된다[5, 6].

III. 시뮬레이션

일반적으로 사용되는 기존의 집속방법과 제안한 방법의 왕복(two-way) 음장 특성을 비교하였다. 시뮬레이션 조건으로 3.5MHz, 128 소자, 85mm 크기의 선형어레이를 이용하여 128 채널의 point spread function을 구하였다. 기존의 방법은 송신시 초음파 음장을 영상 중심의 한 점에 집속(one point transmit focusing)시키고, 수신 시에는 신호처리에 의하여 모든 영상점에 동적집속(receive dynamic focusing)시킨다. 기존의 방법은 60 mm에 송신집속을 하였고, 제안한 방법은 평면파의 경사각 β_{max} 를 ± 20 도로 정하고 1도 간격씩 진행방향이 다른 평면파를 중첩하였다. 따라서 41번 송신하게 되며 각각 수신한 데이터를 저장한 뒤 이로부터 송신음장으로 제한회절범을 합성하고 수신은 동적집속으로 영상을 얻는다. 구해진 음장의 mainlobe의 영점(null point)사이의 폭은 이론적으로 1.29 mm가 된다. 그림 (3)은 위로부터 각각 30, 60, 90, 120 mm 깊이에서 얻은 음장을 60dB 까지 그린 것이다. 왼쪽은 기존의 방법이며 오른쪽은 제안한 방법이다. 제안한 방법이 상대적으로 sidelobe가 적게 나타난다.

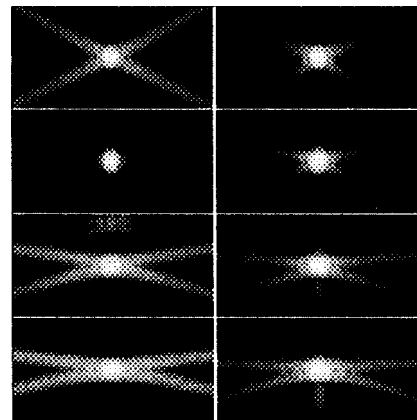


그림 3. 위로부터 30, 60, 90, 120mm 깊이의 음장특성. 왼쪽이 기존의 방법으로 송신의 초점이 60mm 깊이, 오른쪽이 제안한 방법

Fig. 3 Field responses at depths of 30, 60, 90, and 120 mm from top to bottom. Left image:conventional method(focal depth at 60 mm) and right image: proposed method.

각각의 측방향 음장특성을 그림 (4)와 (5)에 도시하였다. 그림 (4)는 기존의 방법으로 실선은 송신 초점 깊이에 해당되는 60 mm에서의 결과이며, 장점선은 30mm, 단점선은 90mm, 일점쇄선은 120 mm깊이에서의 특성이다. 그림 (5)에 제안한 방법의 음장특성을 같은 방법으로 도

시하였다. 제안한 방법이 전체적으로 sidelobe가 줄어들었다. mainlobe도 초점깊이를 제외한 곳에서 좋은 특성을 나타낸다. 그림 (6)에 -6dB의 mainlobe의 빔폭을 깊이에 따라 그렸다.

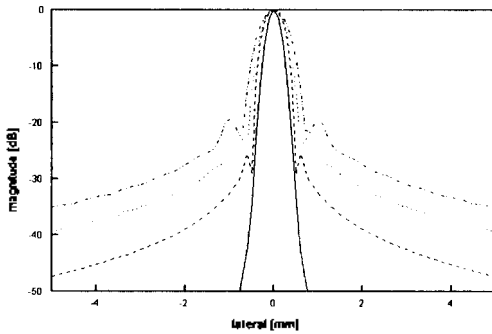


그림 4. 기존의 방법의 깊이에 따른 측방향 음장특성. 실선은 송신 초점 깊이인 60mm이며, 장점선은 30mm, 단점선은 90mm, 일점쇄선이 120mm깊이의 경우

Fig. 4 Lateral field response of conventional method with increasing depth (solid line: 60mm, dashed line: 30mm, dotted line: 90mm, and single dot and dashed line: 120mm).

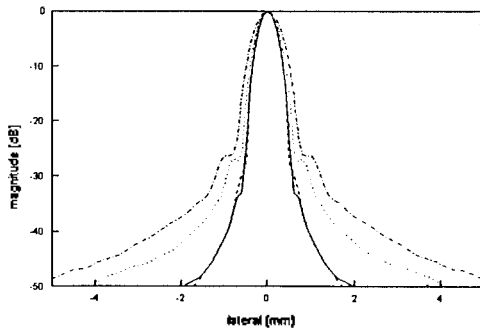


그림 5. 제안한 방법의 깊이에 따른 측방향 음장특성. 장점선은 30mm, 실선은 60mm, 단점선은 90mm, 장-단점선은 120mm깊이의 경우

Fig. 5 Lateral field response of proposed method with increasing depth (dashed line: 30mm, solid line: 60mm, dotted line: 90 mm, and single dot and dashed line: 120mm).

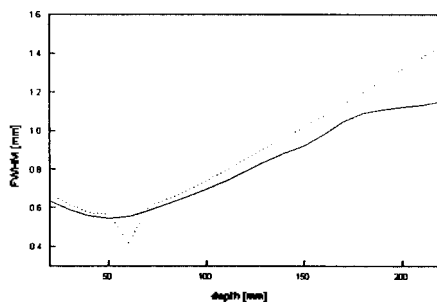


그림 6. 깊이에 따른 mainlobe의 FWHM(-6dB)의 폭. 실선이 제안한 방법, 점선이 기존의 방법

Fig. 6 Plot of FWHM versus depth (solid line: proposed method and dotted line: conventional method).

IV. 결 론

제한회절음장은 음장깊이가 길다는 장점을 가지지만 해상도가 떨어지고 하드웨어로 구현하기 어려운 단점도 가지고 있다. 본 논문에서는 제한회절음장을 구현할 때 합성된 송신음장을 사용하지 않고 진행방향에 다른 pulsed mode 평면파를 각각 송신하여 반사된 신호로부터, 송수신 집속된 음장을 신호처리에 의하여 합성하였다. 따라서 기존의 방법보다 하드웨어로 쉽게 구현이 가능하다. 하지만 한 장의 영상을 얻기 위하여 여러 번의 송신을 해야하므로 정지해 있거나 또는 느리게 움직이는 물체를 영상화하는 경우에 사용할 수 있다는 제한이 있다. 제안한 방법은 시뮬레이션을 통하여 음장거리 뿐만 아니라, sidelobe의 크기와 mainlobe의 폭에서 기존의 집속방법에 비하여 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. J. Durkin, "Exact solutions for nondiffracting beams. I The scalar theory," J. Opt. Soc. Amer., vol. 4, no. 4, pp. 651-654, Apr. 1987.
2. J.-Y. Lu and J.F.Greenleaf, "Nondiffracting X waves-Exact solutions to free-space scalar wave equation and their finite aperture realizations", IEEE UFFC, vol. 39, no. 1, pp. 19-31, Jan. 1992.
3. Jian-yu Lu, "2D and 3D high frame rate imaging with limited diffraction beams", IEEE UFFC, vol. 44, no. 4, July, 1997.
4. Jian-yu Lu, "Experimental study of high frame rate imaging with limited diffraction beams", IEEE UFFC, vol. 45, no. 1, Jan., 1998.
5. Mok-Kun Jeong, T.K.Song, S.B.Park, and J.B.La, "Generation of Sinc wave by a One dimensional array for applications in ultrasonic imaging", IEEE UFFC, vol. 43, no. 2, March, 1996.
6. Mok-Kun Jeong, T.K.Song, and S.B.Park, "Diffraction limited beam for one dimensional array in ultrasonic imaging", K.A.S.A., vol. 14, no. 2E, 1995.

▲정 목 근(Jeong Mok-Kun)

1988년: 서울대학교 전기공학과 학사
 1990년: KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 1995년: KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 1998년~현재: 대전대학교 전자·통신공학부 조교수
 ※주관심분야: 디지털신호처리, 초음파 영상시스템

▲권 성 재(Kwon Sung-Jae)

1984년: 경북대학교 전자공학과 학사
 1986년: KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 1990년: KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 1998년~현재: 대전대학교 전자·통신공학부 전임강사

※주관심분야: 통신이론, 신호처리, 역산란

▲안 영 복(Ahn Young-Bok)

1984년: 건국대학교 전자공학과 학사

1987년: KAIST 전기 및 전자공학과 석사

1990년: KAIST 전기 및 전자공학과 박사

1998년~현재: 건국대학교 전자공학과 부교수

※주관심분야: 신호처리, 초음파영상