

## 선형 파면을 이용한 새로운 합성구경 기법

장진호 · 송태경

서강대학교 전자공학과

(2001년 4월 20일 접수, 2001년 8월 16일 채택)

### A New Synthetic Aperture Technique Using Linear Wave Fronts

J.H. Chang and T.K. Song

Department of Electronics, Sogang University

(Received April 20, 2001. Accepted August 16, 2001)

**요약**: 본 논문에서는 초음파 영상의 성능을 결정하는 중요한 요소인 측방향 해상도를 향상시키기 위한 새로운 합성 구경 집속 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 근사적으로 제한적 회절 특성을 갖고 모든 영상점에서 양방향 동적 집속을 수행할 수 있는 새로운 형태의 초음파 집속 방법으로써, 송신시 구면파가 아닌 수신 부구경의 중심 위치에 대응하는 전파 각도로 평면파를 송신하고 수신된 반사파를 저장한 후 수신된 다수의 신호들을 합성하여 각 주사선을 구성한다. 본 논문에서는 제안된 기법의 특성을 무한 송신 구경을 이용한 이론적 해석을 통하여 분석하였으며 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 또한 제안된 기법이 실제 어레이 변환자를 사용하는 유한 구경 환경에서도 구현될 수 있음을 보였다. 그리고 제안된 기법과 기존 방법의 음장 등고선을 비교하여 제안된 기법이 월등한 측방향 해상도를 제공함을 확인하였다.

**Abstract**: In this paper, we propose a new synthetic aperture focusing scheme for improving the lateral resolution which is one of the most important factors determining the quality of ultrasound imaging. The proposed scheme enables full round-trip dynamic focusing with approximately limited diffraction property. This properties are obtained through transmitting plane waves of which the traveling angle varies with the receive subaperture position, as opposed to stepping the spherical wave source across an array in other synthetic aperture focusing schemes, and employing dynamic focusing in receive. In this paper, the properties of the proposed scheme is analyzed in which a hypothetical infinite line source is used to transmit the plane waves and verified through computer simulation results. Also, we show that the proposed scheme is realizable with an array transducer with a finite aperture size. In summary, it is shown through comparison between the field contours of the proposed scheme and the conventional scheme that the proposed scheme can improve greatly the lateral resolution of ultrasound imaging.

**Key words**: Medical ultrasound imaging, Synthetic aperture, Linear wave front

## 서 론

초음파 영상 장치의 성능을 결정하는 중요한 요소인 측방향 해상도(lateral resolution)는 최근 20년간 급속하게 향상되었다. 이러한 측방향 해상도의 향상은 어레이 변환자(array transducer)를 사용하여 수신시 모든 영상점에서 실시간으로 동적 집속을 수행함으로써 이루어진 것이다.[1, 2]. 하지만 이

기법은 실시간 영상을 위해 송신 집속점이 고정되어 있기 때문에 송신 집속점외의 다른 영상점에서는 측방향 해상도가 여전히 좋지 않다. 이를 극복하기 위해 최근에 합성 구경 집속(Synthetic Aperture Focusing : SAF) 기법을 이용한 양방향 동적 집속 기법들이 제안되었다[3-6]. 이러한 SAF는 한 개 또는 여러 개의 송신 소자를 사용하여 구면파(spherical wave)를 송신하고, 여러 개의 수신 소자에 의해 수신된 신호를 메모리에 저장하는 과정을 단계적으로 수행한다. 결국 SAF는 각 송수신 과정에 의해 획득한 RF 데이터를 적당한 시간 지연을 주어 합성함으로써 양방향 동적 집속을 수행하게 된다.

그러나 SAF 기법도 음파가 측방향(Axial Direction)으로 진행해 나감에 따라 음장의 회절 특성(Diffraction Property)에 의해 빔 폭이 선형적으로 증가하는 특성을 갖고 있다. 즉 음장

본 논문은 2001년도 산업자원부 공업기반기술개발사업 지원에 의하여 이루어졌음.

통신저자: 장진호, (121-741)서울시 마포구 신수동 1,  
서강대학교 전자공학과  
Tel.02-707-3007, Fax. 02-707-3008  
E-mail. jhchang@sogang.ac.kr

의 회절 특성으로 인하여 관찰 깊이가 증가함에 따라 해상도가 낮아지는 문제가 발생한다. 이를 극복하기 위한 한 방법으로 최근까지 제한적 회절 빔(Limited Diffraction Beam : LDB)에 관한 연구가 진행되고 있다.[7-9]. 하지만 지금까지 제안된 LDB는 높은 크기의 측엽(sidelobe)을 갖기 때문에 실제 영상 장치에 적용하기에 적당하지 않다. 이런 이유로 LDB를 초음파 영상 장치에 적용하기 위해서는 수신시 반드시 동적 집속을 사용하여야만 한다.

본 논문에서는 구면파를 송신하는 대신에 평면파를 송신하여 SAF를 수행함으로써 LDB 특성을 갖는 새로운 양방향 동적 집속 기법을 제안한다. 제안된 기법은 데이터 획득(data acquisition)과 빔 구성(Beamforming)에서는 기존의 SAF 방식과 동일하다. 그러나 기존의 SAF 방식에서는 각 송신 채널의 위치를 변화시키면서 구면파를 송신하는 것에 반하여, 제안된 방법에서는 모든 어레이 소자를 사용하여 수신 부구경(Subaperture)의 위치에 따라 다른 각도의 평면파를 송신한다. 제안된 기법은 RF 데이터를 합성할 때 송신된 평면파가 각 영상점에서 중첩이 되도록 하기 위한 시간 지연과 수신 동적 집속을 위한 시간 지연을 고려하여 합성함으로써 주사선들을 구성한다. 이런 과정을 통하여 근사적으로 LDB 특성을 갖고, 양방향

동적 집속이 된 빔 패턴을 얻게 된다. 본 논문에서는 제안된 기법의 특성을 무한 송신 구경을 이용한 이론적 해석을 통하여 분석하였으며 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 또한 제안된 기법이 실제 어레이 변환자를 사용하는 유한 구경 환경에서도 구현할 수 있음을 보였다.

### 제안된 합성 구경 기법의 이론적 해석

#### 1. 수식적 전개

그림 1은 본 논문에서 제안하는 새로운 합성 구경 기법의 송수신 방식을 설명하기 위한 일차원 선형 음원(line source) 모형을 보여 주고 있다. 그림에서 x-축은 측방향(lateral direction)을, z-축은 축방향(axial direction)을 나타내고 있으며 실제 초음파 변환자를 사용하는 경우에는 그림에 표시되어 있지 않은 y-축이 고도방향(elevational direction)을 표시하게 된다. 이 논문에서는 해석의 편리를 위하여 실제 송수신 변환자의 고도방향 구경 크기(aperture size)를  $h$ 라 할 때 최대 관찰 깊이가  $h^2/\lambda$ 으로 표현되는 Fresnel 깊이보다 작다고 가정하여 그림에서와 같이 xz 평면상의 음파 전달 특성만을 해석할 것이다. 또한 송신 시에는 그림 1(a)와 같이 무한 구경(infinite aperture)을 사용하여 z-축과  $\theta$ 의 각도를 이루는 평면파를 전송한다고 가정한다. 수신시에는 그림 1(b)와 같이 유한 구경(finite aperture)을 사용하고 구하고자 하는 주사선( $x = x_s$ ) 상의 모든 영상점 ( $x_s, z$ )에서 초음파를 집속하는 동적 집속을 수행한다.

이제 그림 1(a)의 송신 파형은 다음과 같은 2-D 파동 방정식을 만족하여야 한다[10, 11].

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\Phi = 0 \tag{1}$$

여기서  $c$ 는 초음파의 속도이고,  $t$ 는 시간 변수,  $\Phi$ 는 파동의 속도 포텐셜(velocity potential)이다. 이제 식 (1)을 만족하며 그림 1(a)와 같이 x-축과  $\theta$ 의 각도를 이루고 전송되는 송신 파형은 임의의 관찰점 ( $x, z$ )에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi_\theta(x, z, t) = e^{-jk(\sin\theta)x} e^{jk(\cos\theta)z} e^{-j\omega t} = \Psi_\theta^t(x, z) e^{-j\omega t} \tag{2}$$

여기서  $\omega$ 는 파의 각주파수를 나타내며,  $k = \omega/c$ , 그리고  $\Psi_\theta^t(x, z)$ 는 2차원 공간상에서의 송신 평면파에 대한 빔 패턴이다. 한편 그림 1(b)에서와 같이 그 중심이  $x = \zeta$ 에 위치한 유한한 크기의 수신 부구경(subaperture)에 의한 빔 패턴은 Rayleigh 회절공식을 이용하여 다음과 같이 표현된다[12].

$$\Psi_\zeta^r(x, z) = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p(x_0 - \zeta)}{R} e^{jk(R - R_r + z)} dx_0 \tag{3}$$

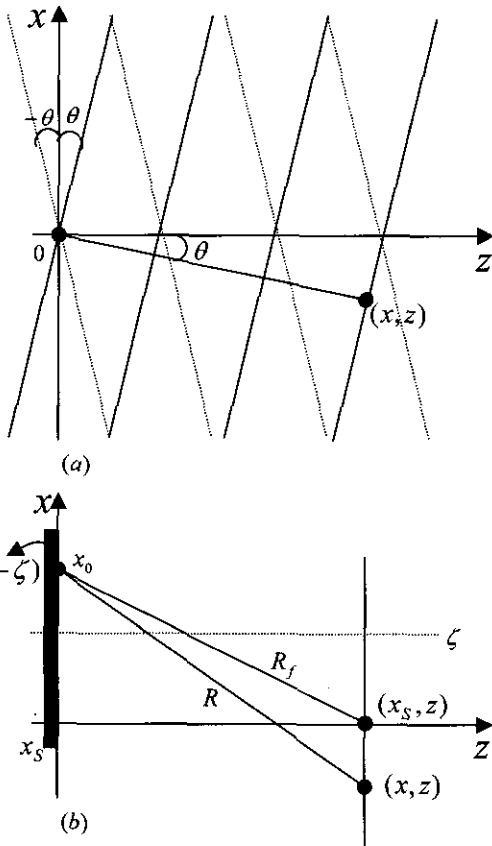


그림 1. 새로운 합성구경 기법의 모형 (a)송신 모형 (b)수신 모형  
Fig. 1. New SAF Scheme (a)Transmit model (b)Receive model

여기서  $x_0$ 는  $z=0$ 에서의 x좌표,  $p(x_0)$ 는  $x_0=0$ 에 대하여 대칭인 수신 부구경 함수(receive aperture function),  $R$ 은 수신 부구경 상의 한 점으로부터 임의의 관찰점  $(x, z)$ 까지의 거리,  $R_f$ 는 수신 부구경 상의 한 점과 영상점  $(x_s, z)$ 까지의 거리를 나타내고 있다. Fresnel 근사를 적용하여 식 (3)은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다[12].

$$\begin{aligned} \Psi'_\zeta(x, z) &= c_0 \int_{-\infty}^{\infty} p(x_0 - \zeta) e^{-jk \frac{(x-x_0)}{z} x_0} dx_0 \\ &= c_0 P_r \left( \frac{x-x_s}{\lambda z} \right) e^{-jk \frac{(x-x_0)}{z} \zeta} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$c_0 = \frac{1}{j\lambda z} e^{jk \left( z + \frac{(x^2 - x_s^2)}{2z} \right)} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_r \left( \frac{x-x_s}{\lambda z} \right) &= F[p_r(x_0)]_{f_s = (x-x_s)/\lambda z} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} p(x_0) e^{-jk \frac{(x-x_0)}{z} x_0} dx_0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)은  $x = \zeta = 0$ 에 위치한 수신 변환자를 영상점  $(x_s, z)$ 에 집속하였을 때의 빔패턴을 나타낸다. 여기서  $\lambda$ 는 파장(wave length)을 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 합성구경 기법에서는 식 (2)로 표현되는 송신 평면파의 전파 각도  $\theta$ 를 수신구경의 위치  $\zeta$ 에 따라 다음과 같이 변경한다.

$$\sin \theta = \sin \left( \frac{\zeta}{\eta} \right) \quad (7)$$

여기서  $\eta$ 는 임의의 상수로써 매번 송신할 때마다 송신 평면파의 전파각도의 변화량과 최대 전파각도( $\theta_{\max} = \zeta_{\max} / \eta$ )를 결정한다. 제안된 방법에서는 이렇게 서로 다른 각도로 송신 평면파를 전송하고, 각 송신 평면파에 의하여 반사된 신호를 그 각도에 대응하는 위치에 있는 수신 부구경을 이용하여 수신한 후 메모리에 저장한다. 모든 송수신 과정을 마친 후 일정한 영역의 여러 수신 부구경들에 의하여 수신된 신호들을 각각 해당 주사선 상에 동적 집속하고, 이렇게 동적 집속된 여러 수신 부구경의 신호들을 적절히 결합함으로써 각 주사선을 구성하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 집속된 초음파 빔패턴은 식 (2)와 (3)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_s(\zeta - \gamma) k(\zeta) \Psi'_\theta(x, z) \Psi'_\zeta(x, z) d\zeta \quad (8)$$

여기서  $p_s(\zeta)$ 는 한 주사선을 합성하기 위해 사용되는 수신

부구경의 범위를 나타내는 함수로써 합성 창틀 함수(synthetic window function)로 표현할 것이며,  $k(\zeta)$ 는 동적 집속된 여러 수신 부구경 신호들을 결합할 때 사용하는 합성 송신 지연(synthetic transmit delay)이다[3]. 식 (8)에서  $\gamma$ 는 각 주사선을 합성할 때 사용되는 합성 창틀 함수의 중심 위치를 나타낸다.

만일  $\theta_{\max} \ll 1$ 이라면 식 (7)은

$$\sin \theta = \sin \left( \frac{\zeta}{\eta} \right) \approx \frac{\zeta}{\eta} \quad (9)$$

과 같이 근사화 할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (8)을 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi(x, z) &= \\ c_0 P_r \left( \frac{x-x_s}{\lambda z} \right) &\int_{-\infty}^{\infty} p_s(\zeta - \gamma) k(\zeta) e^{-jk \frac{(x-x_s)}{z} \zeta} e^{-jk \frac{\zeta^2}{2z}} e^{jk \sqrt{1 - (\zeta/\eta)^2} z} d\zeta \end{aligned} \quad (10)$$

이때 다음과 같은 합성 송신 지연을 이용하면

$$k(\zeta) = e^{jk \frac{\zeta^2}{2z}} e^{-jk \sqrt{1 - (\zeta/\eta)^2} z} \quad (11)$$

식 (10)으로부터 아래 식 (12)로 주어지는 최종적인 빔패턴을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \Psi(x, z) &= c_0 P_r \left( \frac{x-x_s}{\lambda z} \right) \int_{-\infty}^{\infty} p_s(\zeta - \gamma) e^{-jk \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{\eta} \right) (x-x_s) \zeta} d\zeta \\ &= c_0 e^{-jk \left( \frac{x-x_s}{z_{eq}} \right) \gamma} P_r \left( \frac{x-x_s}{\lambda z} \right) P_s \left( \frac{x-x_s}{\lambda z_{eq}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $z_{eq}$ 는  $z$ 와  $\eta$ 의 함수로

$$z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{z} + \frac{1}{\eta}} = z / \eta \quad (13)$$

와 같이 표현되므로, 앞으로 등가 깊이(equivalent distance)로 부르기로 한다.

식 (12)는 모든 영상점에 대하여 성립하며 수신구경 함수  $p_r(x_0)$ 의 푸리에 변환  $P_r(\cdot)$ 과 합성 창틀 함수  $p_s(\zeta)$ 의 푸리에 변환  $P_s(\cdot)$ 의 곱으로 표시되므로 본 논문에서 제안하는 합성구경 기법을 이용하여 양방향 동적 집속이 가능함을 알 수 있다. 하지만 이러한 결과를 얻기 위해서는 식 (9)의 근사식이 만족되어야 하는데, 컴퓨터를 이용한 모사실험 결과  $\theta_{\max} = \zeta_{\max} / \eta \leq 0.4$ 이 적당한 것을 확인하였다.

## 2. 제안된 기법의 특성

앞서 무한 송신 구경을 가정한 이론적 해석으로 제안된 기법이 LDB 특성과 양방향 동적 집속 기능을 동시에 가지고 있

음을 보였다. 식 (12)에서  $P_r(\cdot)$ 은 수신 구경에 의한 빔 패턴으로 일반적인 수신 동적 집속 기법의 수신 빔 패턴과 동일하다. 하지만  $P_s(\cdot)$ 은 제안된 기법에 의한 고유한 빔 패턴으로 일반적인 수신 동적 집속 기법[1, 2]은 물론이고 양방향 동적 집속이 가능한 합성 구경 기법[3, 4, 6]의 합성 송신 빔 패턴과도 다르다.  $P_s(\cdot)$ 은 식 (6)에서  $p_r(\cdot)$  대신  $p_s(\cdot)$ ,  $x_0$  대신  $\zeta$ 를 사용하고,  $f_x = (x - x_s)/\lambda z_{eq}$ 일 때 얻어지는 결과로써,  $p_s(\zeta)$ 의 폭이 클수록 또  $z_{eq}$ 가 작을수록 빔 폭이 좁아진다. 예로써  $p_s(\zeta) = \text{rect}(\zeta/D_s)$ 로 표현되는 폭이  $D_s$ 인 합성 창틀 함수를 사용하는 경우  $P_s(\cdot)$ 의 주엽폭(mainlobe width)는  $\lambda z_{eq}/D_s$ 로 주어진다. 그런데  $z_{eq}$ 는  $\eta$ 에 영향을 받으므로  $\eta$ 와 합성 창틀 함수  $p_s(\zeta)$ 가 제안된 기법의 빔 패턴에 영향을 미치는 주요한 요소가 된다. 이러한  $\eta$ 와  $p_s(\zeta)$ 가 빔 패턴에 미치는 영향에 대해 구체적으로 살펴보도록 하겠다.

먼저 등가 깊이  $z_{eq}$ 는 다음과 같은 특성들을 갖는다. 첫째로  $z_{eq}$ 는  $z$ 와  $\eta$ 중 작은 값보다 언제나 작다. 둘째로  $z = \eta$ 인 곳에서의 등가 깊이는  $z_{eq} = z/2 = \eta/2$ 이다. 셋째로  $z \gg \eta$ 인 경우에는  $z_{eq} \approx \eta$ 로 주어진다. 따라서, 제한된 기법은 언제나 기존의 방식보다 좁은 측방향 빔 폭을 갖음을 알 수 있다. 보다 구체적으로  $z < \eta$ 인 경우에는  $z_{eq} < z < \eta$ 이므로 식 (12)의  $P_s(\cdot)$ 의 주엽폭은 일반적인 방법의 송신 빔패턴의 빔 폭보다는 작지만 선형적으로 증가한다.  $z = \eta$ 의 곳에서는 기존의 빔 폭의 반이 되며 깊이가 더 커질수록 빔폭이 증가하게 될 것이다. 하지만  $z$ 가 아무리 커져도  $z_{eq}$ 의 최대값은  $\eta$ 로 제한되므로  $z > \eta$ 인 영역에서의 빔 폭 역시 최대  $\lambda\eta/D_s$ 로 제한되게 된다.

이러한 이유로 본 논문에서는 제안된 기법의 빔 패턴의 특징을 깊이에 따라 두 영역으로 나누어 설명할 것이다. 첫째  $z \leq \eta$ 인 영역은 빔 폭이 선형적으로 증가하므로 FSR(Front Spreading Region)로, 둘째  $z > \eta$ 인 영역은 빔 폭이 근사적으로 일정하게 유지되는 것으로 생각하여 NSR(Non-Spreading Region)로 정의한다. 그러나, 실제 영상의 경우에 초음파의 송수신은 유한 구경을 사용하여 이루어진다. 즉,  $N$ 개의 변환소자로 구성된 실제적인 선형 어레이의 총 구경의 크기는 소자 사이의 간격을  $d$ 라고 할 때  $N \cdot d$ 로 주어진다. 따라서 실제로는 무한 구경의 경우와는 달리 선형파가 전달될 수 있는 깊이가 제한되고 이보다 깊은 곳에서는 식 (12)의 빔 패턴을 갖지 못하게 되며 그 결과 빔 폭이 다시 깊이에 따라 증가하게 된다. 본 논문에서는 이러한 영역을 RSR(Rear Spreading Region)으로 정의할 것이다.

그림 2는  $\zeta_{max} = 64 \times 0.3 = 19.2\text{mm}$ 로 일정하게 놓았을 때  $\eta$ 가 등가 깊이 변화에 미치는 영향을  $\eta$ 값이 각각 192mm ( $\theta_{max} = 0.1$  radian : 점선), 96mm ( $\theta_{max} = 0.2$  radian : 쇄선), 64mm ( $\theta_{max} = 0.3$  radian : 실선), 48mm ( $\theta_{max} = 0.4$

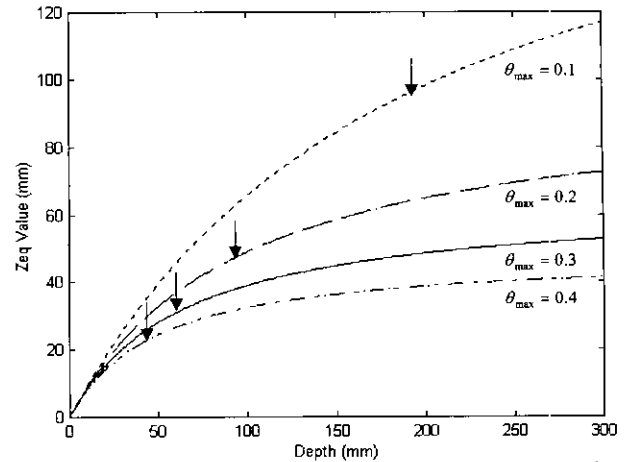


그림 2. 최대 송신 각도에 따른 등가 깊이의 변화

Fig. 2. Equivalent depth as a function of maximum transmit angle

radian : 일점 쇄선)일 때에 대하여 보여 주고 있다. 또한 각 경우에 대한 NSR의 시작 깊이를 그림에 화살표로 표시하였다. 그림 2에서 확인 할 수 있듯이  $\eta$ 값이 작을수록 NSR이 더 작은 깊이에서 시작된다. 즉 일정한  $\zeta_{max}$ 에 대해 최대 전파 각도를 증가시키면  $\eta$ 가 감소하여 빔 폭이 일정하게 유지되는 시점을 앞당길 수 있게 된다. 여기서 최대 전파 각도는 식 (9)를 만족하도록 선택하여야 하며,  $\eta$ 는 또한 뒤에 설명할 것과 같이 최대 영상 깊이에도 영향을 미치므로 응용에 따라 적절히 선택되어야 한다.

한편  $P_s(\cdot)$ 의 주엽폭과 측엽폭은  $p_s(\zeta)$ 의 폭과 형태에 따라 결정되므로  $p_s(\zeta)$ 는  $z_{eq}$ 와 함께 제안된 기법의 빔 패턴을 특징지우는 결정적인 요소이다. 그런데 주어진  $\eta$ 의 값에 대하여  $p_s(\zeta)$ 의 폭, 또는  $\zeta_{max}$ ,에 따라  $\theta_{max}$ 가 결정되지만 식 (12)에 나타낸 최종적인 빔 패턴은  $\theta_{max}$ 와는 무관하다. 따라서 제안된 기법의 빔 패턴은  $\eta$ 와  $p_s(\zeta)$ 의 폭과 형태에 의하여 결정되며 사용되는 송신 빔의 최대각도와는 직접적인 관계가 없음을 알 수 있다. 대신에  $\theta_{max}$ 는 뒤에 논의할 것과 같이 유한 송신 구경을 이용하는 경우에 있어서 다른 변수들과 함께 각 주사선별로 최대 영상 깊이를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 또한, 식 (12)의 결과로부터 사용되는 수신 부구경들의 범위의 중심을 표시하는  $\gamma$ 는 이론적으로 제안된 기법의 빔 패턴에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.  $\gamma$  역시 유한 송신 구경의 경우에 있어서 최대 영상 깊이를 조절하는데 사용될 수 있음을 후에 설명할 것이다.

지금까지 살펴본 제안된 기법의 빔 특성은 그림 3과 그림 4의 컴퓨터 모사 실험을 통해 확인 할 수 있다. 그림 3은  $x_s = \gamma = 0$ 일 때 제안된 기법(a)과 기존 방식(b)의 -6dB, -20dB 빔 폭을 깊이에 따라 비교하기 위해 수행한 컴퓨터 모사 실험의 결과이다. 컴퓨터 모사 실험을 위해 3.5 MHz의 중

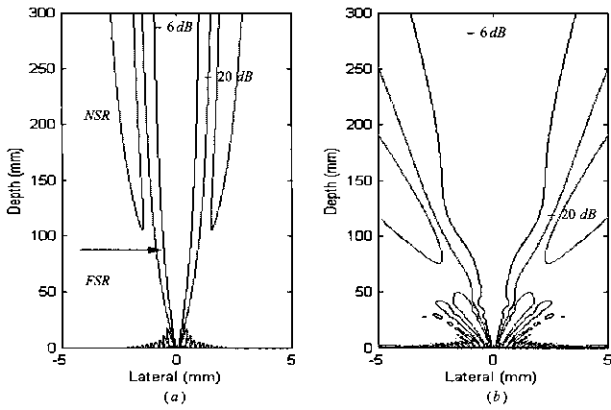


그림 3. 송수신 음장의 등고선 (-6dB, -20dB) (a) 제안된 기법 ( $\theta_{max} = 0.2 \text{ radian}$ ) (b) 기존의 방식(송신 집속점 : 60mm)  
 Fig. 3. Contour plots of transmit and receive sound fields (-6dB, -20dB)  
 (a) Proposed scheme ( $\theta_{max} = 0.2 \text{ radian}$ )  
 (b) Conventional scheme (transmit focal depth : 60mm)

심 주파수를 갖는 정현파를 사용하였다. 기존의 방법은 소자 간격이  $d = 0.3 \text{ mm}$ 이고 128개의 소자를 갖는 선형 어레이를 이용하였으며, 하나의 주사선을 구성하기 위해 64개의 소자로 구성된 동일한 크기의 송신 구경 ( $D_t = 64d$ )과 수신 구경 ( $D_r = 64d$ )을 사용하고, 송신시는 60mm에 고정 집속을 하며 수신시에는 동적 집속을 하였다. 제안된 기법은 무한 송신 구경을 사용하지만 수신 부구경 함수는 기존의 방법과 마찬가지로 64개의 소자로 구성된다고 가정하였다. 또한 합성 창틀 합

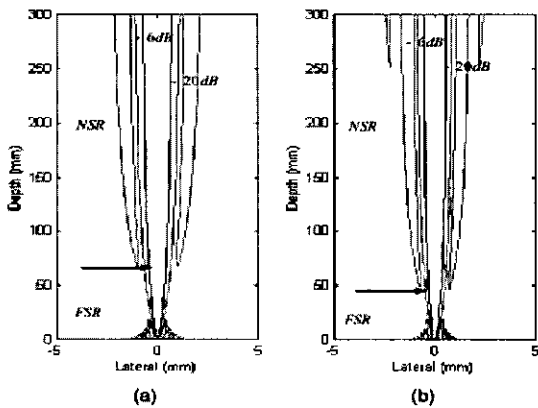


그림 4. 최대 전파 각도에 대한 제안된 기법의 송수신 음장 등고선 변화 (-6dB, -20dB)  
 (a)  $\eta = 64 \text{ mm}$  ( $\theta_{max} = 0.3 \text{ radian}$ )  
 (b)  $\eta = 48 \text{ mm}$  ( $\theta_{max} = 0.4 \text{ radian}$ )  
 Fig. 4. Changes in the contour beam plots of the proposed scheme (-6dB, -20dB)  
 (a)  $\eta = 64 \text{ mm}$  ( $\theta_{max} = 0.3 \text{ radian}$ )  
 (b)  $\eta = 48 \text{ mm}$  ( $\theta_{max} = 0.4 \text{ radian}$ )

수  $p_s(\zeta)$ 의 폭  $D_s$ 는  $D_r = 64d$ 과 같게 하였으며, 최대 전파 각도  $\theta_{max}$ 가 0.2 radian ( $\zeta_{max} = 64 \times 0.3 = 19.2 \text{ mm}$ ,  $\eta = 96 \text{ mm}$ )이 되도록 하였다.

그림 3(a)에 표시된 제안된 방법의 빔 패턴을 보면 FSR에서는 -6dB되는 빔 폭이 선형적으로 증가하다가 NSR에서 거의 일정한 폭을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반하여 그림 3(b)에 표시한 기존 방식의 빔 패턴은 송신 집속점인 60mm 근방에서 좁은 빔 폭을 보이다가 이를 벗어나면 빔 폭이 빠르게 증가하고, 전체적으로 -6dB, -20dB되는 빔 폭이 제안된 기법보다 큰 것을 확인할 수 있다. 특히  $\eta = 96 \text{ mm}$ 에서의 -6dB 빔 폭은 각각 1.2mm(a)와 2.75mm(b)로 해석 결과와 같이 약 2배의 차이를 보여 주고 있다. 한편 그림 4는 제안된 기법에 있어서  $\eta$ 가 측방향 해상도에 미치는 영향을 살펴보기 위한 컴퓨터 모사 실험 결과로서  $\eta$ 값이 작을 때 FSR의 영역과 -6dB 빔 폭이 감소함을 보여 주고 있다. 이상의 결과로부터 제안된 기법이 LDB 특성을 갖는다는 사실을 확인할 수 있다.

### 제안된 기법의 구현 방법과 특성

제안된 기법은 실제 초음파 영상 시스템에 사용되는 유한한 크기를 갖는 선형 어레이 변환자를 사용하여 근사적으로 구현할 수 있다. 즉 모든 어레이 소자에 편향 시간 지연(stearing time delay)을 적용함으로써 근사적으로 평면파를 송신할 수 있으며, 매 송신시마다 송신 각도에 대응하여 수신 부구경을 이동하면서 수신한 반사파를 메모리에 저장한다. 이런 과정을 통하여 저장된 반사파들을 합성 송신 시간 지연과 수신 동적 집속을 위한 시간 지연을 고려하여 식 (8)과 같이 결합함으로써 한 프레임 영상을 구성하게 된다. 그러므로 제안한 기법의 프레임 율(Frame Rate)은 기존의 초음파 영상 시스템의 경우와 같다. 이것은 그림 5에 표시된 기존의 방법(a,b)과 제안된

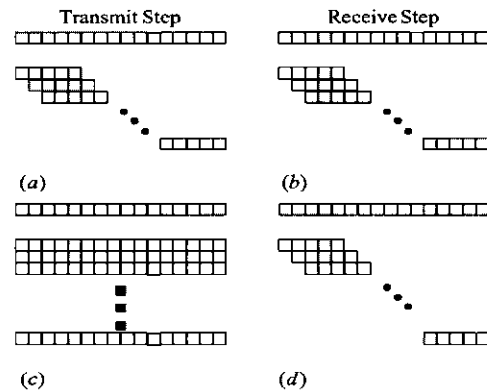


그림 5. 초음파 영상을 구성하기 위한 송수신 과정  
 (a),(b) 기존의 방법 (c),(d) 제안된 기법  
 Fig. 5. Transmit and receive steps for ultrasound imaging  
 (a),(b) Conventional scheme (c),(d) Proposed scheme

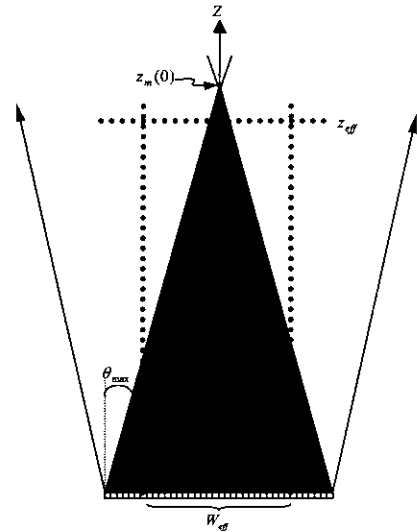


그림 6. 제안된 기법의 유효 영상 영역  
Fig. 6. Physical imaging area of the proposed scheme

기법(c,d)에 대한 송수신 과정을 보면 쉽게 확인할 수 있다.  $N_T$ 를 한 프레임 영상을 구성하기 위한 주사선의 개수라 하면 기존의 초음파 영상 시스템의 전체 송수신 과정은  $N_T$ 가 된다. 즉, 기존의 초음파 영상 시스템은 하나의 주사선을 얻기 위해 한번의 송수신 과정을 수행한다. 제안된 기법에서는 매번 송신할 때마다 모든 어레이 소자들을 사용하며 수신 방법은 기존 방식과 동일하므로 전체 송수신 과정이  $N_T$ 임을 알 수 있다.

제안된 기법을 구현할 때의 문제점은 송신 구경의 크기  $D_x (= D_t)$ 가 감소함에 따라 최대 영상 깊이가 줄어든다는 것이다. 유한 송신 구경에서  $D_t$ 에 의한 최대 영상 깊이의 변화는 최대 송신 각도와 합성 창틀 함수의 위치를 결정하는  $\gamma$ 에 의해서도 영향을 받는다. 무한 송신 구경의 경우에는 없는 이러한 제한은 송신 구경의 크기가 유한하기 때문에 평면파가 전파해 나감에 따라 서로 중첩되는 영역이 줄어들어 생기는 것이다. 그림 6은 모든 송신 파가 중첩될 수 있는 영역을 어두운 부분으로 표시한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 전파 각도가 클수록 중앙 주사선 ( $x = x_s = 0$ )의 최대 영상 깊이를 나타내는  $z_m(0)$ 이 작아진다. 그러나 합성 창틀 함수의 폭과 그 위치를 결정하는  $\gamma$ 에 의해 최대 영상 깊이를 증가시킬 수 있는데, 이것들이 최대 영상 깊이에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 것이 그림 7이다.

그림 7은  $x = x_s = 0$ 과  $x = x_s > 0$ 에 위치한 두 주사선의 최대 영상 깊이가 어떻게 결정되는가를 보여주고 있다. 여기서  $z_m(0)$ 와  $z_m(x_s)$ 는 전송되는 평면파의 최대 전파 각도  $\zeta_{max}/\eta$  일 때 두 주사선의 최대 영상 깊이를 나타낸다. 이때 각 주사선별 최대 영상 깊이는 다음과 같이 표현된다.

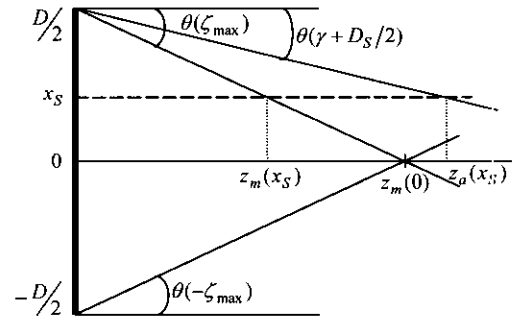


그림 7. 제안된 기법의 최대 영상 깊이  
Fig. 7. Maximum imaging depth of the new SAF method

$$z_m(x_s) = \frac{D_t/2 - x_s}{\tan(\theta_{max})} \approx \eta \frac{D_t/2 - x_s}{\zeta_{max}} \quad (14)$$

그러나 식 (14)에서 표현된 각 주사선별 최대 영상 깊이는 합성 창틀 함수의 폭  $D_s$ 와 그 위치를 결정하는  $\gamma$ 에 의해서 증가시킬 수 있다. 이를 확인하기 위하여 먼저 이들 두 변수에 대한 송신 평면파의 양의 최대 전파 각도를 계산하면  $(\gamma + D_s/2)/\eta$ 가 된다. 따라서 임의의 주사선에 대한 최대 영상 깊이  $z_a(x_s)$ 는 다음과 같이 계산되며, 이 깊이를 앞서 설명한 유한 구경 경우의 후방 확산 영역(RSR)이 시작하는 지점으로 정의한다.

$$z_a(x_s) = \frac{D_t/2 - x_s}{\tan[(\gamma + D_s/2)/\eta]} \approx \eta \frac{D_t/2 - x_s}{\gamma + D_s/2} \quad (15)$$

식 (15)에 의하면  $z_a(x_s)$ 는 각 주사선의 위치  $x_s$ 에 따라 다르고, 송신 변환자의 크기  $D_t$ 와  $\eta$ 에 비례하여 증가한다. 또한 합성 창틀 함수의 폭을 작게 하거나 그 위치를 적당히 이동함으로써 (즉,  $\gamma$ 를 조절하여)  $z_a(x_s)$ 를 증가시킬 수 있다. 특히 그림 7의 경우  $\gamma$ 를  $-D_s/2$ 에 가깝게 정하게 되면  $z_a(x_s)$ 를 크게 증가시킬 수 있다. 이는 주사선이 양의  $x$ 축 위치에 있을 때 양의 전파 각도로 송신된 평면파는  $z_m(x_s)$  이후의 영상점에는 기여를 하지 않지만 음의 전파 각도로 송신된 평면파는 모두 기여를 하기 때문이다. 즉, 이렇게 주어진 영상점에 기여하는 평면파들에 대한 신호들만을 이용하여 합성하면 최대 영상 깊이가 증가된다. 이 때 측방향 해상도는 앞에서 설명한 것과 같이 실제 사용되는 송신 평면파의 최대 각도와는 무관하고  $\eta$ 와  $D_s$ 에 의해서 결정되므로,  $\gamma$ 와  $\eta$  그리고  $D_s$ 를 적당히 선택하여 원하는 측방향 해상도와 최대 영상 깊이를 얻을 수 있다.

### 유한 송신 구경의 컴퓨터 모사 실험

유한한 크기의 선형 어레이를 사용하여 제안된 기법을 구현

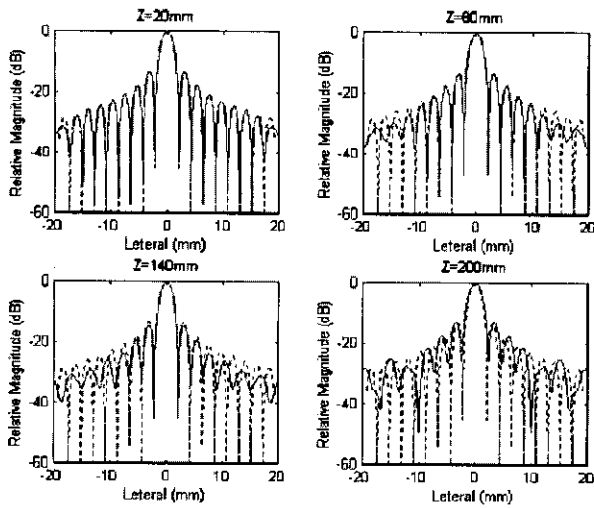


그림 8. 무한 송신 구경과 유한 송신 구경의 송신 빔 패턴

..... 무한 송신 구경  
 \_\_\_\_\_ 유한 송신 구경

Fig. 8. Transmit beam patterns of Infinite and finite apertures

..... Infinite Transmit Aperture  
 \_\_\_\_\_ Finite Transmit Aperture

할 수 있음을 보이기 위하여 그림 4의 실험에서 사용된 3.5MHz 선형 어레이를 사용하여 컴퓨터 모사 실험을 실시하였다. 별도로 밝힌 경우가 아니면 모든 실험에서 제안된 기법에 대해서는 합성 송신 창틀 함수의 폭  $D_s$ 와 수신 부구경의 크기는 모두  $64d$ 이고 송신 구경은 전체 어레이를 사용하였기 때문에  $128d$ 로 택하였다. 기존 방식에 대한 송신 및 수신 부구경의 크기는 모두  $64d$ 로 고정하였다.

그림 8은 최대 전파 각도  $\theta_{max}$ 가 0.2 radian ( $\zeta_{max} = 192mm$ ,  $\eta = 96mm$ )인 경우에 대하여 무한 송신 구경(점선)으로 평면파를 송신하였을 때의 송신 빔 패턴이 유한 송신 구경(실선)에서는 어떻게 변화하는지를 보여준 것이다. 그림 8에서 송신 구경이 유한할 경우라도 작은 깊이에서는 무한 송신구경의 경우와 거의 같은 송신 빔 패턴을 보이다가 깊이가 증가함에 따라 측엽의 값들이 달라지고 200mm에서는 주엽의 폭이 미세하지만 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 이 깊어 이후부터는 유한 송신 구경의 주엽폭이 점점 증가하게 될 것이다. 이러한 결과는 유한 송신 구경을 사용하여 제안된 기법을 근사적으로 구현할 수 있음을 보여 주는 것이다.

그림 9는  $\gamma = x_s = 0$ 인 유한 송신 구경의 경우에  $\eta$  값이 제안된 기법의 빔 패턴에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 그림 9(a)는  $\eta = 96mm$ 일 때 음장의 등고선을 나타내고 그림 9(b)는  $\eta = 48mm$ 일 때 음장의 등고선을 나타낸다. 무한 송신 구경의 FSR과 같이 그림 9(a)는 FSR이  $\eta$ 값과 같은 96mm까지이고 그림 9(b)의 경우에는 FSR이 48mm까지임을 확인할 수 있다. 또 48mm, 96mm 깊이에서 -6dB 빔 폭이 그림 9(a)의

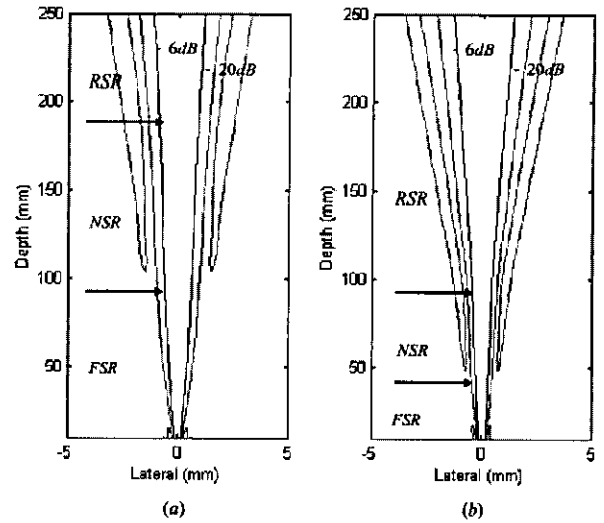


그림 9. 제안된 기법의 확산 영역

(a)  $\eta = 96mm$  ( $\theta_{max} = 0.2$  radian)

(b)  $\eta = 48mm$  ( $\theta_{max} = 0.4$  radian)

Fig. 9. The spreading range of the proposed scheme

(a)  $\eta = 96mm$  ( $\theta_{max} = 0.2$  radian)

(b)  $\eta = 48mm$  ( $\theta_{max} = 0.4$  radian)

경우는 각각 0.74mm, 1.22mm이고, 그림 9(b)의 경우는 0.62mm, 0.89mm로  $\eta$  값이 감소할수록 그 빔 폭이 더 작아짐

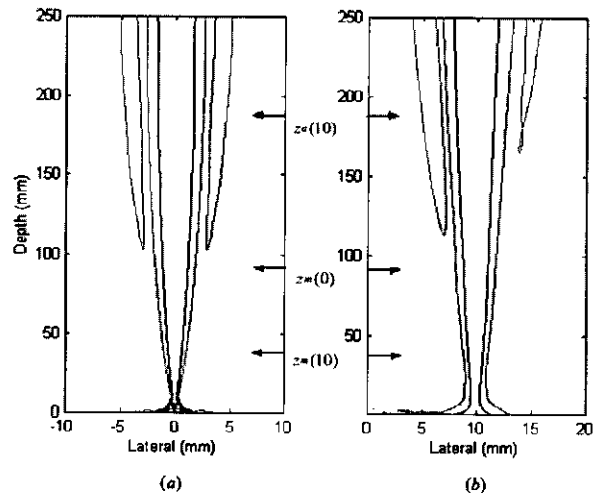


그림 10.  $\gamma = 0$  이고 유한 송신 구경을 사용했을 때 두 주사선에 대한 제안된 기법의 송수신 음장의 등고선 비교 (-6dB, -20dB)

(a)  $x_s = 0$  에서의 송수신 음장의 등고선

(b)  $x_s = 10mm$ 에서의 송수신 음장의 등고선

Fig. 10. Comparison of two-way contour plots of the transmit and receive sound fields (-6dB, -20dB) of the proposed method with a finite aperture, when  $\gamma = 0$ , at (a)  $x_s = 0$  and (b)  $x_s = 10mm$

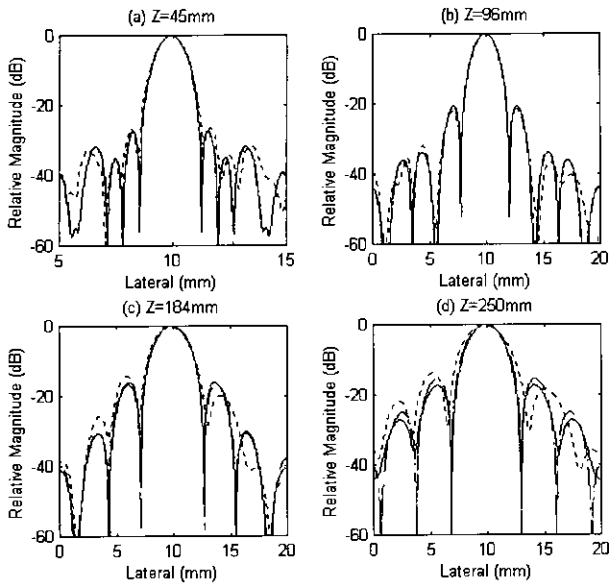


그림 11. 축방향 빔 패턴 비교 ( $\gamma=0$ )

- .....  $x_s = 10\text{mm}$  일 때 유한 송신 구경의 축방향 빔 패턴
- $x_s = 0$  일 때 유한 송신 구경의 축방향 빔 패턴
- - - - -  $x_s = 0$  일 때 무한 송신 구경의 축방향 빔 패턴

Fig. 11. Comparison of lateral beam patterns ( $\gamma=0$ )

- ..... Lateral beam pattern of a finite transmit aperture at  $x_s = 10\text{mm}$
- Lateral beam pattern of a finite transmit aperture at  $x_s = 0$
- - - - - Lateral beam pattern of an infinite transmit aperture at  $x_s = 0$

을 알 수 있다. 이것은 유한 송신 구경의 경우에서도  $\eta$ 가 빔 폭과 FSR을 결정짓는 요소로 작용함을 보여주는 것이다. 또한 앞서 정의했던 유한 송신 구경만의 특성인 RSR도  $\eta$ 에 의해서 결정되는데  $\gamma = x_s = 0$ 일 때 식 (15)에 의해서 RSR은  $z = z_a(0) = 2\eta$  깊이에서 시작된다. 이것은 그림 9를 통하여 검증할 수 있다. 즉 그림 9(a)는 RSR이 192mm에서 시작되고 그림 9(b)는 96mm에서 시작됨을 보여준다. 이러한 RSR의 시작값들은 같은 조건일 경우에 대해 식 (14)에 의해서 계산되는 최대 전파 각도에 의한 최대 영상 깊이  $z_m(0)$ 보다 2배 증가된 것으로 이러한 최대 영상 깊이의 증가는 앞서 설명한  $p_s(\zeta)$ 의 폭에 의해 결정되는 합성 전파 각도의 영향이다. 이러한 최대 영상 깊이는 전에 설명했듯이 합성 창틀 함수  $p_s(\zeta)$ 의 폭  $D_s$ 뿐만 아니라 그 중심 위치  $\gamma$ 를 조정함으로써 더욱 증가시킬수 있는데, 그림 10, 11, 12, 13을 통해 이러한 요소들이 최대 영상 깊이에 미치는 영향에 대해 자세히 살펴보겠다.

그림 10, 11은 합성 창틀 함수  $p_s(\zeta)$ 의 폭  $D_s$ 가 최대 영상 깊이에 미치는 영향에 대해 살펴보기 위한 컴퓨터 모사 실험

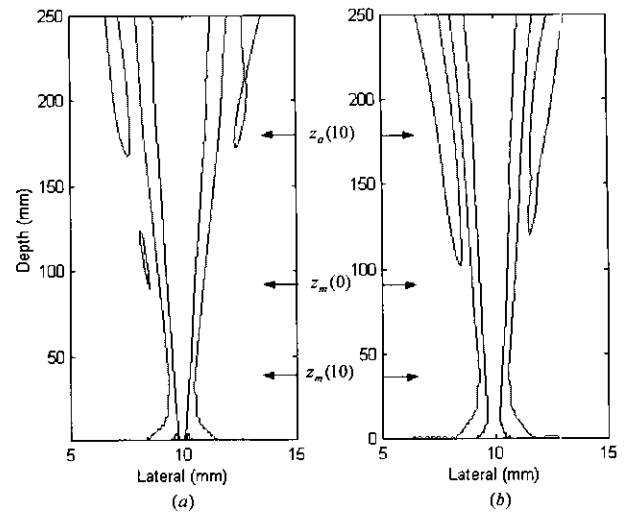


그림 12. 유한 송신 구경을 사용하였을 때  $x_s = 10\text{mm}$  인 주사선에 대한 제안된 기법의 송수신 음장의 등고선 비교(-6dB, -20dB) (a)  $\gamma=0$  에서의 송수신 음장의 등고선 (b)  $\gamma=-15d$  에서의 송수신 음장의 등고선

Fig. 12. Contour plots of the two-way sound fields (-6dB, -20dB) for the scan line  $x_s = 10\text{mm}$  due to the proposed method using a finite transmit aperture (a)  $\gamma=0$  (b)  $\gamma=-15d$

결과이다. 그림 10은  $D_s = 32d$  이고  $\gamma=0$ 일 때  $x = x_s = 0$ 에 위치한 주사선(a)과  $x = x_s = 10\text{mm}$ 에 위치한 주사선(b)의 송수신 음장의 등고선을 나타낸 것이다. 다른 조건들은 같게 하고 합성 창틀 함수의 크기만  $D_s = 64d$ 로 놓았을 때 두 주사선에서의 최대 영상 깊이는 식 (15)에 의해서 각각  $z_a(0) = 192\text{mm}$ ,  $z_a(10) = 92\text{mm}$ 가 되나  $D_s = 32d$ 로 했을 경우 식 (15)와 그림 10에서 확인할 수 있듯이  $z_a(0)$ ,  $z_a(10)$ 의 크기가 각각 384mm, 184mm으로  $D_s = 64d$ 일 때 보다 2배 가량 증가한다. 이는  $x = x_s = 0$ 에서  $D_s = 64d$ 일 때의 송수신 음장의 등고선을 나타낸 그림 3(a)와  $D_s = 32d$ 일 때의 그림 10(a)를 비교함으로써 검증된다. 그리고 두 컴퓨터 모사 실험 결과의 비교를 통해 확인 할 수 있는 또 다른 사실은  $D_s$ 의 크기가 빔 폭을 결정한다는 것이다. 즉 그림 3(a)의 경우  $z = z_m(0) = 96\text{mm}$ 에서의 -6dB 빔 폭은 1.2mm인 것에 비해 그림 10(a)는 2.364mm로  $D_s$ 이 1/2 감소함에 따라 빔 폭은 약 2배 증가함을 보인다. 결국 같은 조건일 때  $p_s(\zeta)$ 의 폭이 증가함에 따라 빔 폭은 반비례하여 감소하고  $z_a(x_s)$ 은 비례하여 증가하게 되는데, 이는 앞서 언급한  $p_s(\zeta)$ 의 폭이 빔 패턴에 미치는 영향을 잘 설명해 주는 것이다.

그림 11은  $z = z_m(10) = 45\text{mm}$  (a),  $z = z_m(0) = 96\text{mm}$  (b),  $z = z_a(10) = 184\text{mm}$  (c),  $z = 250\text{mm}$  (d)의 깊이에서  $D_s = 32d$ ,



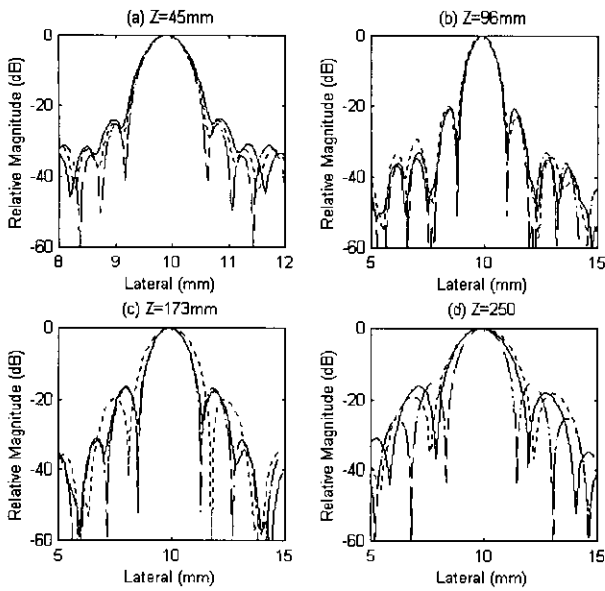


그림 13. 측방향으로의 양방향 빔 패턴 비교

- $x_s = 10\text{mm}$  &  $\gamma = -15d$  일 때 유한 송신 구경의 측방향 빔 패턴
- .....  $x_s = 10\text{mm}$  &  $\gamma = 0$  일 때 유한 송신 구경의 측방향 빔 패턴
- - - - -  $x_s = 0$  &  $\gamma = 0$  일 때 무한 송신 구경의 측방향 빔 패턴

Fig. 13. Comparison of two-way lateral beam patterns  
 ————— Lateral beam pattern of a finite transmit aperture at  $x_s = 10\text{mm}$  &  $\gamma = -15d$   
 ..... Lateral beam pattern of a finite transmit aperture at  $x_s = 10\text{mm}$  &  $\gamma = 0$   
 - - - - - Lateral beam pattern of an infinite transmit aperture at  $x_s = 0$  &  $\gamma = 0$

$\gamma=0$ 일 때  $x=x_s=0$ 에서의 유한 송신 구경(실선)과  $x=x_s=10\text{mm}$ 에서의 유한 송신 구경(점선)에 대한 양방향 빔 패턴들과 비교를 위하여  $x=x_s=0$ 에서의 무한 송신 구경(일점 쇄선)에 대한 양방향 빔 패턴을 그린 것이다.  $x=x_s=0$ 일 때 유한 송신 구경의 빔 패턴 경우에는 그 주엽폭이  $z=250\text{mm}$ 에서도 무한 송신 구경의 주엽폭과 같으나,  $x=x_s=10\text{mm}$ 일 때 유한 송신 구경의 빔 패턴 경우  $z=184\text{mm}$ 에서는 무한 송신 구경의 주엽폭과 같지만  $z=250\text{mm}$ 에서는 무한 송신 구경의 주엽폭보다 더 벌어져 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 합성 창틀 함수의 중심 위치를 나타내는  $\gamma$ 가 최대 영상 깊이에 미치는 영향에 대해 살펴보겠다. 그림 12는  $D_s=64d$ ,  $x_s=10\text{mm}$ 에 대해서  $\gamma=0$ 인 경우의 송수신 음장의 등고선(a)과  $\gamma=-15d$ 인 경우의 송수신 음장의 등고선(b)을 나타낸 것이고, 그림 13은 주사선이  $x=x_s=0$ 에 위치할 때 무한 송신 구경(일점 쇄선)의 측방향 빔 패턴과

$x=x_s=10\text{mm}$ 에 위치하고 각각  $\gamma=0$ (점선),  $\gamma=-15$ (실선)일 때의 유한 송신 구경의 측방향 빔 패턴을  $z=z_m(10)=45\text{mm}$  (a),  $z=z_m(0)=96\text{mm}$  (b),  $z=z_a(10)=173\text{mm}$  (c),  $z=250\text{mm}$  (d)의 깊이에 대해 나타낸 것이다. 그림 12(a)와 그림 13에서 알 수 있듯이  $\gamma=0$ 인 경우  $z=z_m(0)=96\text{mm}$  이후부터는 주엽폭이 증가된다. 반면에  $\gamma=-15d$ 의 경우엔  $z=z_a(10)=173\text{mm}$ 까지는 무한 송신 구경과 같은 주엽폭을 보임을 그림 12(b)와 그림 13을 통하여 확인할 수 있다. 더욱이 180mm, 190mm, 200mm 깊이에서의 -6dB 빔 폭이 그림 12(b)의 경우에는 각각 1.705mm, 1.7801mm, 1.861mm값을 갖고 무한 송신 구경의 경우에는 -6dB 빔 폭이 각각 1.634mm, 1.669mm, 1.702mm값을 갖는데, 각 깊이에서 무한 송신 구경의 -6dB 빔 폭에 대한 그림 12(b)의 -6dB 빔 폭의 퍼센트 증가량이 각각 4.34%, 6.64%, 9.34%로 190mm까지는 무한 송신 구경과 그림 12(b)의 -6dB 빔 폭이 근사적으로 같다고 볼 수 있다. 결과적으로 그림 12, 13의 컴퓨터 모사 실험의 결과들은  $\gamma$ 를 적당히 선택함으로써 영상의 유효 깊이를 증가시킬 수 있음을 보여주고 있는 것이다.

### 토의 및 결론

본 논문에서는 근사적으로 제한적 회절 특성을 갖고 양방향 동적 집속을 수행 할 수 있는 새로운 합성 구경 기법을 제안하고 그 특성들을 이론적으로 해석하고 컴퓨터 모사 실험을 통하여 검증하였다. 제안된 기법은 구면파가 아닌 수신 부구경의 중심 위치에 대응하는 전파 각도로 평면파를 송신하고 그 수신된 신호를 저장한 후 여러 방향으로 송신된 평면파들에 대한 수신신호들을 합성하여 각 주사선을 구성한다. 그 결과 제안된 기법은 제한적 회절 특성을 갖는 양방향 동적 집속을 가능하게 하고 이에 따라 기존의 방법들보다 우수한 측방향 해상도를 제공할 수 있다. 제안된 기법의 영상 영역은 빔 패턴의 특성에 따라 FSR, NSR, RSR의 세 영역으로 나누어 정의하였는데, FSR에서는 측방향 빔 폭이 선형적으로 증가하지만 기존의 방법보다는 언제나 작으며 NSR 영역에서는 근사적으로 균일한 측방향 빔 패턴을 유지할 수 있다. 이러한 특징을 갖는 영상 영역의 최대 깊이는 유한 길이의 송신 변환자를 사용할 경우에는 주사선마다 다르게 제한되지만, 합성 창틀 함수의 크기와 그 중심 위치를 적당히 선택함으로써 요구되는 영상의 깊이를 제공할 수 있음을 이론 및 실험을 통하여 확인하였다.

본 논문에서는 논의되지 않았지만 제안된 기법은 큰 대역폭을 갖는 짧은 펄스를 사용하여도 구현할 수 있으며, 이 경우에는 더욱 향상된 빔 패턴을 제공할 수 있다. 또한 합성 창틀 함수나 수신 부구경 함수에 적당한 amplitude apodization을 적용함으로써 측엽의 크기를 조절할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 일반적인 합성 구경 기법이 적용되는 모든 응용 분야에 사용되어 영상의 화질을 개선하는데 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. A. Macovsky, "Ultrasonic imaging using arrays", Proc. IEEE, Vol. 67, pp. 484~495, Apr. 1979
2. Tai K. Song and Song B. Park, "A new digital array system for dynamic focusing and steering with reduced sampling rate", Ultrasonic Imaging, Vol. 12, pp. 1~116, 1990
3. 송태경, "초음파 선형주사 영상을 위한 합성구경 기법의 해석 및 응용", 대한 의공학회지, 제20권, 제4호, pp. 503~513, 1999. 8
4. G. R. Lockwood, J. R. Talman, and S. S. Brunke, "Realtime 3-D ultrasound imaging using sparse synthetic aperture beamforming", IEEE Trans. UFFC, Vol. 45, No. 4, pp. 980~988, 1998
5. M.H. Bae, M.K. Jeong, "Bidirectional pixel based focusing in conventional B-mode ultrasound imaging", Elec. Letters, Vol. 34, No. 22, Oct., 1998, pp. 2105~2107
6. Mustafa Karaman, Pai-Chi Li, and M. O'Donnell, "Synthetic Aperture Imaging for Small Scale Systems", IEEE Trans. UFFC, Vol. 42, No.3, pp. 429~442, 1995
7. J. Durmin, "Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory", J. Opt. Soc. Amer. Vol. 4, No. 4, pp. 651~654, 1987
8. Jian-yu Lu and James F. Greenleaf, "A study of two-dimensional array transducers for limited diffraction beams", IEEE Trans. UFFC, Vol. 41, No. 5, pp. 724~739, 1994
9. Tai K. Song, J-y. Lu, and J. F. Greenleaf, "Modified X waves with improved field properties", Ultrasonic Imaging, Vol. 15, pp. 36~47, 1993
10. M. K. Jeong, T. K. Song, S. B. Park, and J. B. Rha, "Generation of Sinc wave by a one dimensional array for applications in ultrasonic imaging", IEEE Trans. UFFC, Vol.43, No.2, pp. 285~295, 1996
11. P. M. Morse and H. Feshbach, "Methods of Theoretical Physics, Part I", New York : McGraw-Hill, ch. 4,7
12. Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, 1968