J. Biomed. Eng. Res.
Vol. 25, No. 5, 403-414, 2004

합성구경 기반의 교차어레이를 이용한 실시간 3차원 초음파 영상화 기법 : II. 선형파면 송신 방법

김강식, 송태경

서강대학교 전자공학과
(2004년 7월 19일 접수, 2004년 10월 25일 채택)

Real-Time 3D Ultrasound Imaging Method Using a Cross Array Based on Synthetic Aperture Focusing : II. Linear Wave Front Transmission Approach

Kang-Sik Kim and Tai-Kyong Song

Department of Electronics, Sogang University
(Received July 19, 2004. Accepted October 25, 2004)

요 약: 본 논문의 동반논문에서는 측방향으로는 동적집속, 고도방향으로는 합성구경 기법을 이용하여 빔을 집속함으로써 모든 영상 점에 대해 측방향과 고도방향 모두 동적집속된 효과를 얻을 수 있는 합성구경 기반의 교차어레이를 사용한 3차원 영상화 기법을 제안하였다. 하지만 구면파를 이용한 합성구경 기법은 초음파의 회절현상으로 인해 관찰깊이가 증가함에 따라 빔폭이 증가하여 원거리에서 해상도가 크게 저하되는 단점을 갖는다. 또한 제안된 방법은 송신시 하나의 변환소자만을 사용하므로 송신전력 또한 제한되게 된다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 선형파면과 합성구경 기반의 교차어레이를 이용한 실시간 3차원 초음파 영상화 기법을 제안한다. 제안한 방법에서는 송신시 수평평면에 대해 각기 다른 편향각도를 갖는 선형파면을 송신하고, 반사된 신호들을 측방향으로 놓인 일차원 수신어레이의 전체 구경을 이용하여 수신하게 된다. 수신시 측방향으로는 동적집속, 고도방향으로는 합성구경 기법을 이용하여 빔을 집속함으로써 모든 영상 점에 대해 측방향과 고도방향 모두 동적집속된 효과를 얻을 수 있다. 제안한 방법은 구면파 기반의 합성구경 기법과는 달리 깊은 영상 영역에서 고도방향으로 균일한 해상도를 제공하는 제한회절 특성을 가지는 것을 수학적 해석과 음장 모사실험을 통해 확인하였다. 특히 선형파면 기반의 합성구경 기법은 구면파 기반의 합성구경 기법과 달리 송신어레이의 전체구경을 사용하여 제한된 수의 초음파 송수신과정을 통해 하나의 입체 영상을 얻을 수 있으므로 높은 송신전력과 고해상도를 갖는 3차원 영상을 위한 고속주사에 적합하다.

Abstract : In the accompanying paper, we proposed a real-time volumetric imaging method using a cross array based on receive dynamic focusing and synthetic aperture focusing along lateral and elevational directions, respectively. But synthetic aperture methods using spherical waves are subject to beam spreading with increasing depth due to the wave diffraction phenomenon. Moreover, since the proposed method uses only one element for each transmission, it has a limited transmit power. To overcome these limitations, we propose a new real-time volumetric imaging method using cross arrays based on synthetic aperture technique with linear wave fronts. In the proposed method, linear wave fronts having different angles on the horizontal plane is transmitted successively from all transmit array elements. On receive, by employing the conventional dynamic focusing and synthetic aperture methods along lateral and elevational directions, respectively, ultrasound waves can be focused effectively at all imaging points. Mathematical analysis and computer simulation results show that the proposed method can provide uniform elevational resolution over a large depth of field. Especially, since the new method can construct a volume image with a limited number of transmit-receive events using a full trasnmit aperture, it is suitable for real-time 3D imaging with high transmit power and volume rate.

Key words : Medical ultrasound imaging, Real time 3D imaging, Cross Array, Linear Wave Front, Synthetic Aperture

서 론

이차원 위상 어레이 변환자를 이용한 실시간 3차원 영상화 방법은 일차원 어레이 변환자를 사용하는 경우보다 활성 소자의 수가 크게 늘어나 실제 시스템 구현 시 현재의 기술로는 많은 한계를 가지며, 각 주사선에 대해 초음파를 매번 송수신해야 하므로 불륨 레이트 또한 낮게 된다[1-17]. 이를 해결하기 위해 기존에 제안된 고정집속 기반의 교차어레이를 이용한 3차원 영상화 기법(CA-FF: cross array using fixed focusing)은 실시간 3차원 영상을 위한 고속 주사가 가능하고 측방향으로는 동적집속이 가능하지만, 고도방향으로는 고정집속으로인해 송신집속깊이를 제외하고는 고도방향의 해상도가 저하된다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 논문의 동반논문에서는

통신저자 : 송태경(121-741) 서울시 마포구 신수동 1,
서강대학교 전자공학과
Tel : 02-705-8907, Fax : 02-707-3008
E-mail : tksong@ccs.sogang.ac.kr

합성구경 기반의 교차어레이를 사용한 3차원 영상화 기법(CA-SA: cross array using synthetic aperture)을 제안하였다. 제안한 방법은 송신시 고도방향으로 놓인 일차원 송신 어레이를 이용하여 고도방향으로 고정집속하는 것이 아니라 송신 어레이의 각 변환소자를 한번에 하나씩 순차적으로 송신하고 각각을 측방향으로 놓인 일차원 수신어레이의 모든 변환소자를 이용하여 수신한다. 이렇게 수신된 신호들을 이용하여 측방향으로는 동적집속, 고도방향으로는 합성구경 기법을 이용하여 빔을 집속함으로써 모든 영상 점에 대해 측방향과 고도방향 모두 동적집속된 효과를 얻을 수 있다.

그러나 CA-SA 방법은 송신시에 하나의 변환소자만을 사용하여 초음파를 송신하게 되므로 송신전력은 송신시에 모든 변환소자를 이용하여 고정집속하는 CA-FF 방법에 비해 저하되게 된다. 따라서 CA-SA 기법에서 만약 송신전력을 더욱 증가시킬 수 있다면 더욱 높은 SNR을 갖는 원거리 초음파 영상 획득이 가능하다. 또한 CA-SA 기법은 송신시 하나의 배열소자에서 발생하는 구면파(spherical wave)를 사용하기 때문에 원거리에서 초음파 회절특성에 의한 해상도 저하를 피할 수 없다.

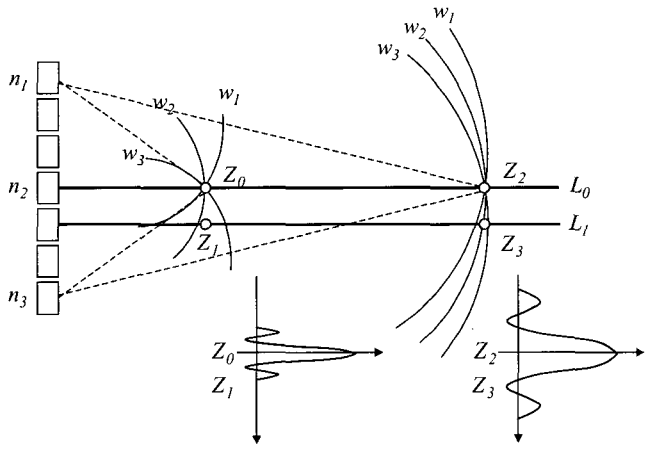


그림 1. 구면파를 이용한 영상.
Fig. 1. Imaging with spherical waves.

그림 1은 구면파의 회절 현상에 의한 원거리에서의 해상도 저하를 설명하기 위한 것이다. 그림 1에서 주사선 L_0 상의 Z_0 영상점에 대해 수신(또는 송신)집속을 하게 되면 L_0 상의 Z_0 상에서는 변환소자 n_1, n_2, n_3에서의 신호 w_1, w_2, w_3의 위상이 정확히 일치하기 때문에 수신집속된 신호의 에코세기가 가장 크다. 반면 주사선 L_0상의 Z_0에서 측방향으로 일정간격 떨어진 주사선 L_1 상의 Z_1 영상점에서는 n_1, n_2, n_3에서 신호의 위상이 서로 달라 집속된 신호의 세기가 Z_0에 비해 크게 감소하게 된다. 따라서 영상점 Z_0, Z_1이 위치한 깊이에서 측방향 빔패턴은 그림 1에 표시된 형태를 가지게 된다. 한편, Z_0, Z_1보다 멀리 떨어진 Z_2, Z_3 에서도 마찬가지 현상으로 인하여 빔 형태가 결정된다. 그런데 Z_2에서 바라본 어레이의 입체각(solid angle)은 Z_0에서 바라본 그것보다 작다. 이에 따라 L_1 상에서 Z_3를 지나는 w_1과 w_3의 교점간의 간격은 Z_1를 지나는 w_1과 w_3의 교점간의 간격보다 작게 된다. 따라서 그림 1에 나타내었듯이 영상점 Z_2, Z_3가 위치한 원거리 깊이에서 측방향 빔폭이 증가하며 그 결과 해상도가 저하된다. 즉, CA-SA 방법은 측방향과 고도방향 모두 동적 집속된 빔패턴을 제공하지만 원거리로 갈수록 측방향 및 고도방향 빔폭은 증가하게 되고 이는 CA-FF 방법 또한 동일하다.

그러나 빔을 구면파가 아닌 평면파(plane wave)로 가정한다면 집속시 초음파의 회절현상에 의한 빔의 퍼짐을 피할 수 있을 것이다. 이를 개념적으로 설명하기 위한 것이 그림 2이다. 이론적으로 무한 송신구경을 사용하여 각기 다른 각도로 평면파를 송신하고 송신된 빔이 모든 영상점에서 중첩이 되도록 한다면 각 평면파에 대한 동일한 위상을 표시하는 w_1, w_2, w_3는 그림 2와 같이 될 것이다. 이 경우 영상점 Z_0, Z_2에서는 구면파의 경우와 같이 모든 신호의 위상이 동일하게 중첩이 되어 집속된 에코 신호의 크기가 가장 크게 된다. 그러나 그림 1의 구면파의 경우와 달리 원거리 깊이의 영상점 Z_3에서도 각기 다른 각도로 송신된 평면파들이 Z_1에서의 위상차와 동일하게 더해지기 때문에 원거리인 Z_3에서도 빔폭은 근거리인 Z_1에서와 동일하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 개념을 근간으로 하여 CA-SA 기법에 비해 우수한 SNR과 고도방향 해상도를 갖는 선형파면과 합속구경 기반의 교차어레이를 이용한 3차원 영상화 방법(CA-SA(LWF): cross array using synthetic aperture based on linear wave front)을 제안한다.

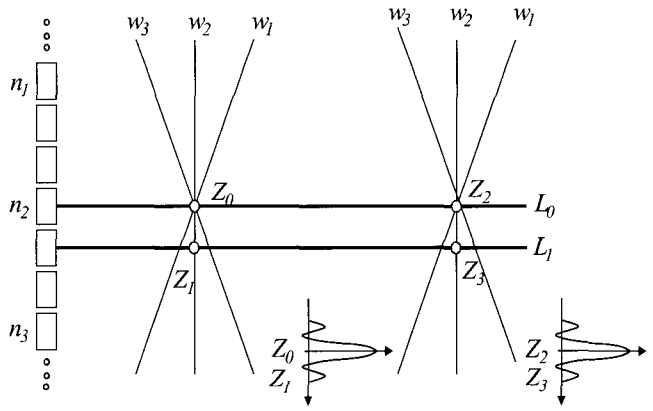


그림 2. 평면파를 이용한 영상.
Fig. 2. Imaging with plane wave.

제안한 방법은 CA-SA 기법과 같이 송신어레이의 각 변환소자를 한번에 하나씩 순차적으로 송신하는 것이 아니라 송신시 교차어레이의 송신어레이의 전체구경을 사용하여 수평평면에 대해 각기 다른 편향각도(steering angle)로 근사적으로 선형파면(또는 평면파)의 특징을 지닌 초음파를 송신한다. 그 후 대상체에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신어레이의 모든 변환소자를 이용하여 수신한 후, 이들 수신신호들을 이용하여 측방향으로는 동적집속, 고도방향으로

는 합성구경 기법을 이용하여 빔을 집속함으로써 모든 영상점에 대해 측방향과 고도방향 모두 동적집속된 효과를 얻을 수 있다. 특히 제안한 방법은 고도방향으로 선형파면 기반의 합성구경 기법을 사용하여 초음파 빔을 집속함으로써 구면파 기반의 합성구경 기법과는 달리 영상깊이에 관계없이 고도방향으로 동일한 해상도를 제공한다. 따라서 이러한 제한적 회절 특성으로 인해 제안한 방법은 구면파 기반의 합성구경 기법과 비교하여 원거리에서 고도방향으로 더욱 향상된 해상도의 영상을 제공한다. 또한, 제안한 방법은 송신어레이의 전체구경을 사용하여 응용에 따라 제한된 수만큼의 초음파 송수신과정을 통해 하나의 입체 영상을 얻을 수 있으므로 높은 SNR과 고도방향으로 고해상도를 갖는 원거리 3차원 영상을 위한 고속주사에 적합하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2절에서는 제안한 선형파면 기반의 3차원 영상화 기법을 레일리 스칼라 회절공식(Rayleigh scalar diffraction wave)을 통해 수학적으로 해석하고, 동반논문에서 언급한 CA-FF, CA-SA 기법과의 비교를 통해 특성을 설명한다. 3절에서는 컴퓨터 모사실험을 통해 제안한 방법의 성능을 평가하고 4절에서 결론을 맺는다.

선형파면과 합성구경 기반의 교차어레이를 이용한 실시간 3차원 영상화 기법

A. CA-SA(LWF) 기법의 음장 해석

본 논문에서 제안하는 CA-SA(LWF) 기법은 송신어레이를 이용하여 평면파를 수평평면에 대해 각기 다른 각도로 송신하고, 수신어레이의 모든 변환소자를 이용하여 수신한 후, 이들 수신신호를 이용하여 측방향으로는 동적집속, 고도방향으로 합성구경 기법을 이용하여 빔을 집속함으로써 모든 영상점에 대해 측방향과 고도방향 모두 동적집속된 효과를 얻는다. 즉, CA-SA 방법과 비교하여 송신 방법이 하나의 변환소자를 사용한 구면파 송신에서 송신어레이의 전체구경을 사용한 특정 편향 각도를 갖는 평면파 송신으로 바뀌게 된다. 그림 3은 CA-SA(LWF) 기법의 음장해석을 위한 송수신 모델이다.

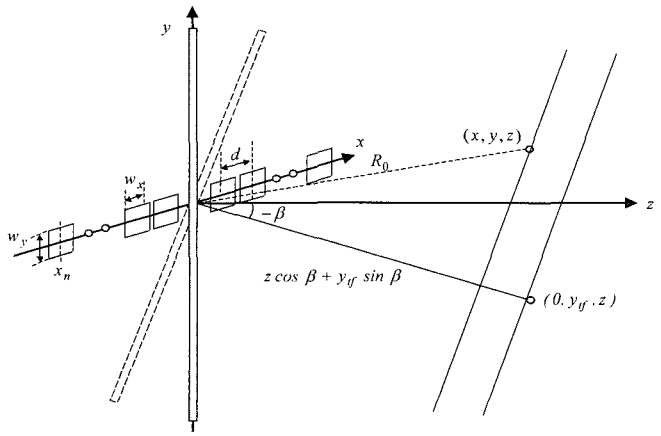


그림 3. CA-SA(LWF) 기법 해석을 위한 송수신 모델.
Fig 3. Transmit/receive model for beam pattern analysis of CA-SA(LWF) method.

수학적 해석을 위해 무한구경의 송신어레이를 가정하여 수평 평면에 대해 임의의 β각도로 평면파를 송신할 때, 임의의 영상점 (x, y, z)에서의 송신 빔패턴 $\Psi^t_\beta(x, y, z)$은 다음과 같이 표현할 수 있다[18].

$$\Psi^t_\beta(x, y, z) = e^{jk(\sin\beta)y} \cdot e^{jk(\cos\beta)z} \tag{1}$$

여기서 $j^2 = -1$, k는 송신신호의 파수(wave number)를 나타낸다.

한편 영상점 (x, y, z)에서 반사된 신호는 측방향(x-방향)으로 놓여있는 $2M+1$개의 변환소자로 이루어진 수신어레이를 통해 수신되며, 이렇게 수신된 신호를 이용하여 수신 집속점 $(x_{rf}, 0, \sqrt{R_0^2 - x_{rf}^2})$에 집속하게 되면 영상점 (x, y, z)에서의 수신 빔패턴은 동반논문에서의 해석결과로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi^r(x, y, z) = c_0 \cdot \sin c\left(W_x \frac{x}{\lambda R_0}\right) \cdot \sin c\left(W_y \frac{y}{\lambda R_0}\right) \cdot \frac{\sin\left(kd \frac{2M+1}{2R_0}(x - x_{rf})\right)}{\sin\left(kd \frac{1}{2R_0}(x - x_{rf})\right)} \tag{2}$$

여기서 W_x, W_y는 각각 수신어레이상의 변환소자의 측방향과 고도방향 크기를, d는 변환소자사이의 간격을 나타낸다. 한편 앞으로 본 논문에서는 수식 전개상 나타나는 수학적 또는 물리적 의미를 가지지 않는 상수항들을 통칭하여 c_n(n:정수)으로 표현한다.

따라서 무한 송신구경 변환자를 사용하여 수평평면에 대해 β각도로 평면파를 송신하고 $(2M+1)$개의 변환소자로 이루어진 수신어레이를 이용하여 $(x_{rf}, 0, \sqrt{R_0^2 - x_{rf}^2})$에 집속했을 때, 임의의 점 (x, y, z)에서 빔패턴은 식 (1)과 식 (2)로 나타나는 송신 및 수신 빔패턴의 곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Psi^{tr}_\beta(x, y, z) &= \Psi^t_\beta(x, y, z) \cdot \Psi^r(x, y, z) \\ &= c_1 \cdot e^{jk(\sin\beta)y} \cdot e^{jk(\cos\beta)z} \cdot \\ &\quad \sin c\left(W_x \frac{x}{\lambda R_0}\right) \cdot \sin c\left(W_y \frac{y}{\lambda R_0}\right) \cdot \\ &\quad \frac{\sin\left(kd \frac{2M+1}{2R_0}(x - x_{rf})\right)}{\sin\left(kd \frac{1}{2R_0}(x - x_{rf})\right)}\end{aligned} \tag{3}$$

즉, 측방향으로는 x-축으로 놓인 수신어레이를 통해 동적 집속이 가능하므로 측방향으로는 CA-FF, CA-SA 방법과 동일하게 $\sin(\cdot)/\sin(\cdot)$ 함수 형태의 집속된 빔패턴

을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

한편 CA-SA(LWF) 기법에서 평면파의 편향각도를 $-L\Delta\beta$ 부터 $L\Delta\beta$ 까지 $\Delta\beta$간격으로 송신 한다고 할 때 선형파면을 이용한 합성구경 방식에 의하여 집속된 초음파 송수신 빔 패턴 $\Psi_{CA-SA(LWF)}(x,y,z)$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Psi_{CA-SA(LWF)}(x,y,z) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_s(n\Delta\beta)\,\Psi^{tr}_{n\Delta\beta}(x,y,z)\,e^{-jkt(n\Delta\beta)} \\ &= c_2 \cdot \sin c\left(W_x \frac{x}{\lambda R_0}\right) \cdot \sin c\left(W_y \frac{y}{\lambda R_0}\right) \cdot \\ &\frac{\sin\left(kd\frac{2M+1}{2R_0}(x-x_{rf})\right)}{\sin\left(kd\frac{1}{2R_0}(x-x_{rf})\right)} \cdot \sum_{n=-L}^{L} e^{-jk(\sin n\Delta\beta)(y-y_{tf})}\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $t(n\Delta\beta)$는 그림 3에 나타내었듯이 합성구경 영상시 β의 편향 각도를 갖는 평면파가 집속점 $(0, y_{tf}, z)$까지 도달하는데 걸리는 지연시간을 고려하여 인가하는 합성 송신지연 함수로 아래와 같이 주어진다.

$$t(n\Delta\beta) = z\cos n\Delta\beta + y_{tf}\sin n\Delta\beta \tag{5}$$

한편, CA-SA(LWF) 기법은 송신시 평면파를 사용하므로 고도방향으로 관찰 평면을 특정깊이 z에서 y-축 방향으로 하기 때문에 집속점을 $(0, y_{tf}, z)$로 하였다. 또한 $p_s(n\Delta\beta)$는 합성구경을 위하여 사용되는 송신 평면파의 각도 및 합성 가중치를 나타내는 합성창틀함수로 본 논문에서는 아래와 같이 송신 평면파의 전체 편형 각도를 $(2L+1)\Delta\beta$가 되도록 하는 사각창 함수를 가정하였다.

$$p_s(n\Delta\beta) = rect\left(\frac{n\Delta\beta}{(2L+1)\Delta\beta}\right) \tag{6}$$

또한 식 (4)에서 송신 평면파의 최대 편향각도를 $L\Delta\beta \ll 1$로 가정하면 다음과 같은 근사가 가능하다.

$$\sin(n\Delta\beta) \simeq n\Delta\beta \tag{7}$$

실제로 $L\Delta\beta \le 0.4(radian)$ 일 때 식 (7)의 근사화가 타당하며[19], 뒤의 모사실험에서도 위의 조건을 만족함을 보일 것이다.

따라서 식 (4)는 최종적으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Psi_{CA-SA(LWF)}(x,y,z) &= c_2 \sin c\left(W_x \frac{x}{\lambda R_0}\right) \sin c\left(W_y \frac{y}{\lambda R_0}\right) \cdot \\ &\frac{\sin\left(kd\frac{2M+1}{2R_0}(x-x_{rf})\right)}{\sin\left(kd\frac{1}{2R_0}(x-x_{rf})\right)} \cdot \sum_{n=-L}^{L} e^{-jkn\Delta\beta(y-y_{tf})} \\ &= c_2 \cdot \sin c\left(W_x \frac{x}{\lambda R_0}\right) \cdot \sin c\left(W_y \frac{y}{\lambda R_0}\right) \cdot \\ &\frac{\sin\left(kd\frac{2M+1}{2R_0}(x-x_{rf})\right)}{\sin\left(kd\frac{1}{2R_0}(x-x_{rf})\right)} \cdot \frac{\sin\left(k\Delta\beta\frac{2L+1}{2}(y-y_{tf})\right)}{\sin\left(k\Delta\beta\frac{1}{2}(y-y_{tf})\right)}\end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)로부터 CA-SA(LWF) 기법에서 측방향과 고도방향으로 첫 번째 제로점에 해당하는 측방향 빔폭 x^L_{bw}와 고도방향 빔폭 y^L_{bw}는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$x^L_{bw} = \frac{\lambda R_0}{(2M+1)d} \tag{9a}$$

$$y^L_{bw} = \frac{\lambda}{(2L+1)\Delta\beta} \tag{9b}$$

여기서 λ 는 송신신호의 파장(wavelength)을 나타낸다.

즉, CA-CA(LWF) 기법은 CA-SA 기법과 비교하면 측방향으로는 동일한 해상도를 제공함을 알 수 있다. 하지만 고도방향으로 살펴보면 CA-SA 기법은 영상깊이 R_0가 증가함에 따라 빔폭이 증가하는 반면에 CA-SA(LWF) 기법의 빔폭은 식 (9b)에서 보듯이 영상깊이 R_0(또는 z)에 관계없이 송신 평면파의 전체 편향각도 $(2L+1)\Delta\beta$에 반비례하여 일정한 것을 알 수 있다. 따라서 식 (9b)에서 보듯이 본 논문에서 제안한 CA-SA(LWF) 기법은 고도방향으로 해상도가 영상깊이에 관계없이 일정한 제한적 회절 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 식 (8)로부터 CA-SA(LWF) 기법의 고도방향 빔패턴에서 첫 번째 그레이팅 로브의 위치 y^L_{GL} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y^L_{GL} = y_{tf} \pm \frac{\lambda}{\Delta\beta} \tag{10}$$

따라서 송신평면파의 편향각도의 증분 $\Delta\beta$가 클수록 그레이팅로브는 영상점(또는 주엽)과 근접한 곳에 나타나므로 나중에 설명할 것과 같이 관심영역과 응용에 따라 적절한 값을 선택하여야 한다.

한편, 지금까지의 해석은 이상적인 선형파면을 발생시키기 위해 무한구경의 송신어레이를 가정하였다. 그러나 실제 구현을 위해 유한구경의 송신어레이를 사용할 경우 이상적인 선형파면을 송신할 수 없게 된다. 하지만 송신어레이의 구경크기를 가능한 크게 하게 되면 관심영역 내에서 근사적으로 평면파를 발생시킬 수 있게 되어 위의 해석이 타당함을 뒤의 모사실험에서 보일 것이다. 또한 CA-SA(LWF) 기법은 실제 유한구경의 송신어레이를 이용하여 구현할 때 각 송신 평면파들이 중첩되는 영역이 제한되므로 고도방향으로 전체 획득 가능한 영상 영역은 제한되게 된다. 이러한 제한은 송신어레이의 구경 크기가 유한

하기 때문에 평면파가 전파해 나감에 따라 서로 중첩되는 영역이 줄어들기 때문이다.

그림 4는 송신어레이의 구경 크기가 D 이고, 송신 평면파의 최대 편향각도가 $\beta_{\max}$인 경우에 CA-SA(LWF) 기법의 주사선별 유효영상 영역을 나타낸다. 그림 4에서 A 영역으로 표시한 부분은 모든 각도의 송신 평면파가 중첩되어 해상도가 식 (9b)와 같이 주어지는 영역을 나타낸다. 또한 그림 4에서 알 수 있듯이 CA-SA(LWF) 기법에서 최대 전파각도 $\beta_{\max}$가 클수록 가운데 주사선의 최대 영상 깊이 $z_{\max}$는 작아짐을 알 수 있다. 즉, CA-SA(LWF) 기법에서 최대 영상깊이 $z_{\max}$까지를 영상화 하기위한 송신 평면파의 최대 전파각도 $\beta_{\max}$는 아래의 조건을 만족하여야 한다.

$$\beta_{\max} \le \tan^{-1}\frac{D}{2z_{\max}} \tag{11}$$

또한 그림 4에서 볼 수 있듯이 유한한 구경크기의 송신 어레이를 사용할 경우에는 주사선이 송신어레이의 중심에서 멀어짐에 따라 중첩되는 평면파의 수가 줄어들게 된다. 즉, 그림 4에서 송신어레이의 크기에 대응하는 사각형에서 모든 평면파가 중첩되는 A 영역을 제외한 부분을 B 영역으로 나타내었다. 이때 B 영역에서의 최소 해상도는 중첩되는 송신평면파의 전체 각도가 그림 4의 A 영역에서 평면파가 이루는 각도($\beta_{\max}$)의 1/2이 되는 송신어레이의 가장 끝 부분에 위치한 주사선에서 나타난다. 그 결과 B 영역에서 송신어레이의 가장 끝 부분에 위치한 경계 주사선에 대한 식 (6)의 합성창틀 함수는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$p_s^e(n\Delta\beta) = rect\left(\frac{n\Delta\beta}{(L+1)\Delta\beta}\right) \tag{12}$$

따라서 식 (12)를 식 (4)에 대입하여 식 (8)을 구하는 과정과 동일하게 전개하면 송신어레이의 경계 주사선에서의 고도방향 빔폭은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{bw(e)}^{L} = \frac{\lambda}{(L+1)\Delta\beta} \tag{13}$$

즉, 식 (9b)와 비교하면, 송신어레이의 경계 주사선에서의 빔폭은 송신어레이의 중심주사선에서 보다 2배만큼 늘어나게 되며 이는 그림 4의 B 영역의 최소해상도(최대 빔폭)가 된다.

한편, 그림 4에서 C 영역은 B 영역에 위치하는 송신 어레이의 경계 주사선상에서 θ만큼의 각도를 갖는 주사선들이 이루는 영역을 나타낸다. C 영역은 B 영역보다 중첩되는 평면파의 수가 줄어들기 때문에 해상도 또한 B 영역보다 저하되게 된다. 즉, C 영역 내에서 송신 어레이의 경계 주사선에서 $\theta(|\theta| \le \beta_{\max})$만큼의 각도를 갖는 주사선에서의 해상도는 식 (13)을 구하는 과정과 동일하게 전개하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$y_{bw(C)}^{L} = \frac{\lambda}{\left\lfloor \frac{\beta_{\max}-\theta}{\Delta\beta} \right\rfloor \Delta\beta} \tag{14}$$

여기서 $\lfloor x \rfloor$는 x 를 넘지 않는 최대 정수를 나타낸다. 즉, C 영역에서 θ 가 커짐에 따라 중첩되는 평면파의 수는 더욱 줄어들어 해상도는 저하되게 된다. 따라서 본 논문에서는 CA-SA(LWF) 기법에서 고도방향으로의 관심영역을 그림 4의 A, B 영역으로 이루어진 사각형으로 제한하며, 이때 관심영역에서 최소 해상도는 식 (13)으로 주어진다. 즉, 식 (8), (13), (14) 로부터 유한 구경의 송신어레이를 사용할 경우의 CA-SA(LWF) 기법의 해상도는 무한 송신구경의 해석결과와 마찬가지로 각 영상점에서 중첩되는 송신 평면파가 이루는 각도에 비례함을 알 수 있다.

한편, 그림 4의 최대 관심 깊이 $z_{\max}$ 에서 y 축방향으로 송신 평면파가 전파하는 최대 위치 $y_{\max}$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$y_{\max} = D + (z_{\max} \cdot \tan\beta_{\max}) \tag{15}$$

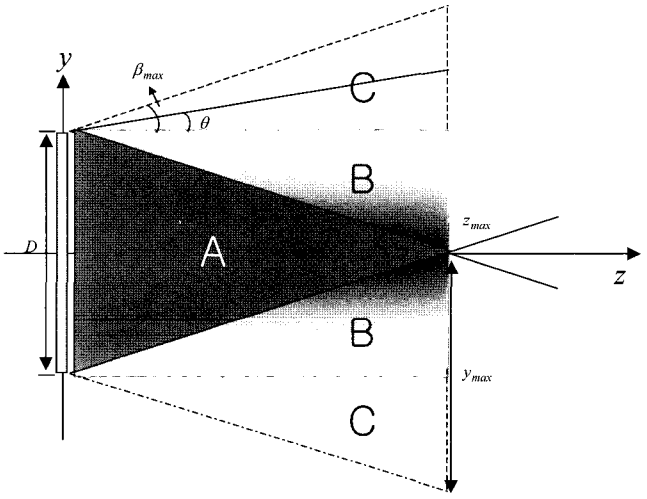


그림 4. CA-SA(LWF) 기법의 주사선별 유효 영상 영역.
Fig. 4. Effective view areas of CA-SA(LWF) method.

따라서 식 (8)에 나타나는 그레이팅 로브의 위치를 식 (15)와 같이 주어지는 최대 전파 위치보다 크게 하면 관심영역에서 모든 그레이팅 로브의 발생을 피할 수 있다. 즉, 그림 4에서 $-\beta_{\max}$ 각도로 송신평면파를 편향하여 송신하였을 때, $(y_{\max}, z_{\max})$위치에 대상체가 있다고 가정하면 이에 대한 반사 신호는 수신어레이를 통해 수신된다. 이때 수신시 합성구경 기법을 이용하여 고도방향으로 빔을 집속하게 되면 그레이팅 로브는 $(y_{\max}, z_{\max})$위치에서 y 축으로 식 (10)만큼 떨어진 곳을 집속하게 될 때 나타나게 된다. 하지만, 본 논문에서는 고도방향으로의 관심영역을 그림 4의 A, B 영역으로 이루어진 사각형으로 제한했기 때문에 그레이팅 로브가 존재하게 되는 위치는 집속을 하지 않게 되고, 그 결과 관심영역내에서 그레이팅 로브는 발생하지 않게 된다. 따라서 그레이팅 로브를 피하기 위한 송신평면파의 편향각도 증분 조건은 식 (10)과 식 (15)로 부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\lambda}{\Delta\beta} \geq y_{\max}$$
$$\Delta\beta \leq \frac{\lambda}{D+(z_{\max} \cdot \tan\beta_{\max})} \quad (16)$$

한편, 본 논문에서는 CA-SA(LWF) 기법의 고도방향 관찰영역을 송신어레이의 구경크기로 제한했기 때문에 넓은 영역을 관찰하기 위해서는 송신어레이의 크기를 가능한 크게 하여야한다. 예를 들어 중심주파수가 3.5MHz이고 인체내 초음파 속도가 1540m/s 일 때 고도방향으로 15cm를 영상화하기 위해서 CA-FF나 CA-SA 기법과 같이 변환소자 간격이 $0.5\lambda(=0.22mm)$인 송신어레이를 사용할 경우 681개의 송신채널 수가 필요하게 된다. 하지만 CA-SA(LWF) 기법은 식 (10)에 나타내었듯이 고도방향으로의 그레이팅 로브가 어레이의 배열소자 간격에 무관하므로 구면파를 이용한 방법과 같이 고도방향으로 그레이팅 로브를 피하기 위한 배열소자 간격 조건($d \leq 0.5\lambda$)을 만족할 필요가 없다. 따라서 배열소자간격을 증가시킴으로써 송신채널 수를 더욱 감소시킬 수 있다. 특히 수평평면에 대해 임의의 각도를 갖는 선형파면을 발생시키기 위해 송신어레이를 모터를 이용하여 기계적으로 회전시키는 방법을 사용한다면 평면파를 발생시키기 위해 송신어레이의 모든 위치에서 동일한 위상을 갖는 신호를 송신하면 되기 때문에 어레이는 단지 하나의 배열소자로 제작가능하다. 그리고 이때 필요한 채널 수는 CA-SA 기법과 같게 된다.

B. 각 기법의 특성 비교

동반논문과 본 논문의 해석결과로부터 CA-FF, CA-SA, 그리고 CA-SA(LWF) 기법의 특성을 측방향과 고도방향 빔폭, 그레이팅로브, 유효영상영역, SNR, 그리고 볼륨 레이트 측면에서 살펴보면 표 1과 같이 요약할 수 있으며 각 특성은 아래와 같다. 표 1에서 $(2M+1)$은 교차어레이의 수신어레이의 변환소자 개수를, $(2N+1)$는 CA-FF, CA-SA 기법에서의 송신어레이의 변환소자 개수를, d 는 변환소자간 간격을 나타낸다. 한편, $(2P+1)d$, $(2L+1)$는 각각 CA-SA(LWF) 기법에서의 송신어레이 구경크기와 송수신 횟수를 나타내고, $\Delta\beta$는 평면파의 송신간격을 나타낸다.

표 1. CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법의 특성 비교.
Table 1. Performance comparison of CA-FF, CA-SA, and CA-SA(LWF) method.

Method	Direction	Half mainlobe width	Grating lobe	View area
CA-FF	lateral	$\lambda R_0/(2M+1)d$	NA	sector
	elevation	$\lambda R_0/(2N+1)d$ $(R_0=R_{tf})$	NA	sector
CA-SA	lateral	$\lambda R_0/(2M+1)d$	NA	sector
	elevation	$\lambda R_0/(2N+1)d$	NA	sector
CA-SA (LWF)	lateral	$\lambda R_0/(2M+1)d$	NA	sector
	elevation	$\lambda/(2L+1)\Delta\beta$ (center) $\lambda/(L+1)\Delta\beta$ (edge)	$\lambda/\Delta\beta$	rectilinear

Method	Direction	Relative SNR	Volume rate
CA-FF	lateral	$\frac{(2N+1)\cdot\sqrt{(2M+1)}}{\sqrt{(2N+1)\cdot(2M+1)}}$ $(R_0 \neq R_{tf})$	$\propto \frac{1}{N_e}$
	elevation		
CA-SA	lateral	$\sqrt{(2N+1)\cdot(2M+1)}$	$\propto \frac{1}{(2N+1)}$
	elevation		
CA-SA(LWF)	lateral	$\frac{\sqrt{(2L+1)\cdot(2M+1)}}{\sqrt{(2P+1)}}$	$\propto \frac{1}{(2L+1)}$
	elevation		

1. 측방향 빔폭

우선 표 1의 세 번째 열은 각 기법의 측방향 및 고도방향 빔폭을 나타낸다. 각 기법에서 빔폭은 $\sin(\cdot)/\sin(\cdot)$ 함수 형태의 동적집속된 빔패턴에서 첫 번째 제로점에 해당하는 주엽폭으로 나타내었다. 우선 각 기법의 측방향 빔폭은 CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법 모두 모든 깊이에서 수신어레이의 구경 크기 $(2M+1)d$에 반비례하여 $\lambda R_0/(2M+1)d$로 주어진다. 이는 모든 방법에서 측방향으로는 수신어레이의 각 변환소자의 수신 지연 값을 조절해 동적집속을 할 수 있기 때문이다.

2. 고도방향 빔폭

표 1의 세 번째 열에서 각 기법의 고도방향 해상도를 살펴보면 CA-FF 방법은 송신집속 깊이 $(R_0=R_{tf})$에서만 동적집속된 빔패턴을 제공하는 반면 CA-SA 방법은 모든 관찰 깊이에서 동적집속된 빔패턴을 제공함을 알 수 있다. 이때, 주엽폭은 송신어레이의 구경크기 $(2N+1)d$에 반비례하여 $\lambda R_0/(2N+1)d$ 로 나타나게 된다.

한편, CA-SA(LWF) 방법의 고도방향 해상도는 CA-SA 기법과 마찬가지로 모든 깊이에서 동적집속된 빔패턴을 제공하는 것을 알 수 있다. 하지만 이 때 빔폭은 CA-SA 기법과 달리 송신 평면파의 전체 편향각도에 반비례하여 송신어레이의 크기에 대응하는 관심영역에서 최대 해상도와 최소 해상도가 각각 $\lambda/(2L+1)\Delta\beta$, $\lambda/(L+1)\Delta\beta$로 주어진다. 즉, CA-SA(LWF) 기법은 CA-FF나 CA-SA 기법과는 달리 고도방향으로 관찰 깊이에 상관없이 동일한 빔폭을 갖는 동적 집속된 빔패턴을 제공한다.

표 1의 고도방향 빔폭을 구하는 식으로부터 최대 해상도를 나타내는 영역에서 CA-SA(LWF) 기법이 CA-SA 기법에 비해 고도방향으로 좁은 빔폭을 갖는 빔패턴을 제공하는 깊이 R_0는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\lambda R_0}{(2N+1)d} \geq \frac{\lambda}{(2L+1)\Delta\beta}$$
$$R_0 \geq \frac{(2N+1)d}{(2L+1)\Delta\beta} \tag{17}$$

또한 식 (17) 로부터 CA-SA 기법과 CA-SA(LWF) 기법에서 동일한 송수신 횟수를 사용할 경우 ($N=L$) CA-SA(LWF) 기법이 CA-SA 기법에 비해 고도방향으로 좁은 빔폭을 갖는 빔패턴을 제공하는 깊이 $R_{\min}$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{\min} \geq \frac{d}{\Delta\beta} \tag{18}$$

즉, CA-SA(LWF) 기법을 이용하여 CA-SA 기법보다 고해상도의 영상을 얻기 위해서는 CA-SA(LWF) 기법에서 송신 평면파의 편향증분 $\Delta\beta$를 가능한 크게 하여야 한다. 하지만 $\Delta\beta$값은 그레이팅 로브 결함을 피하기 위해 식 (16)의 조건 또한 만족하여야 한다. 따라서 $\Delta\beta$값은 응용에 따라 제한된 값을 갖게 되고, 식 (18)의 $R_{\min}$또한 어느 이상 커지게 된다. 이러한 이유로 CA-SA(LWF) 기법은 근거리에서 보다 원거리에서 CA-SA 기법에 비해 월등히 향상된 해상도의 영상을 제공한다.

3. 그레이팅 로브 및 유효영상 영역

표 1의 네 번째와 다섯 번째 열은 각 기법의 그레이팅 로브 특성과 유효영상 영역을 나타낸다. CA-FF와 CA-SA 기법은 일반적인 일차원 위상어레이와 동일하게 배열소자 간격이 $d \leq 0.5\lambda$를 만족하는 교차어레이를 사용할 경우 그레이팅로브 문제가 발생하지 않고 측방향과 고도방향 모두 섹터(sector) 형태의 넓은 영상 영역을 제공한다.

이에 반해 CA-SA(LWF) 기법은 송신 평면파의 편향각도 증분 $\Delta\beta$에 영향을 받아 식 (10)에 나타내었듯이 주엽폭에서 $\lambda/\Delta\beta$만큼 떨어진 위치에 첫 번째 그레이팅 로브가 발생함을 알 수 있다. 또한 CA-SA(LWF) 기법은 측방향으로는 섹터 형태의 영상을 제공하지만, 고도방향으로는 송신어레이의 크기와 최대 편향각도에 의해 영상영역이 제한되게 된다. 본 논문에서는 CA-SA(LWF) 기법의 고도방향으로의 관심영역을 송신어레이의 크기에 해당하는 사각형 영역으로 제한하였다. 따라서 CA-SA(LWF)기법에서는 첫 번째 그레이팅 로브를 관심영역밖에 존재하도록 편향 증분각도 $\Delta\beta$를 식 (16)과 같이 정함으로써 그레이팅 로브 문제를 피할 수 있다.

4. SNR

표 1의 여섯 번째 열은 각 방식에 의해서 집속된 신호의 상대적인 SNR을 나타낸것이다. 즉, 하나의 변환소자를 이용하여 송신한 초음파 신호의 크기를 1로 할 때, 배열소자가 M개인 경우의 초음파 송신 신호의 크기는 같은 영상점에서 $\sqrt{M}$으로 주어진다[20]. 수신시의 신호의 크기도 마찬가지로 계산할 수 있다. 단, CA-FF의 송신 집속점에서는 송신된 초음파를 집속한 크기이므로 상대적으로 송신어레이의 구경 크기만큼 더 커지는 형상을 반영하여 표 1에 $(2N+1)$로 표시하였다. 따라서 신호대 잡음비(SNR: signal to noise ratio) 측면에서는 CA-FF 방법이 송신시 고정 집속을 하므로 CA-FF 기법의 송신 집속점에서는 CA-FF 기법의 SNR이 CA-SA 기법에 비해 $\sqrt{2N+1}$배 높은 것을 알 수 있다. 하지만 송신 집속점 이외의 깊이에서는 두 방법 모두 동일한 SNR을 제공함을 알 수 있다. 또한 CA-SA(LWF) 기법은 송신시 송신어레이의 전체 구경을 이용하여 선형파면을 송신하고, 합성구경을 이용하여 초음파를 집속하므로 송신어레이의 구경크기가 $(2P+1)d$일 때 모든 영상점에서 SNR은 $\sqrt{(2P+1)\cdot(2M+1)\cdot(2L+1)}$로 하나의 입체 영상을 얻기 위해 동일한 송수신 횟수를 사용할 경우 CA-SA 기법에 비해 $\sqrt{2P+1}$배 높게 된다.

5. 볼륨 레이트

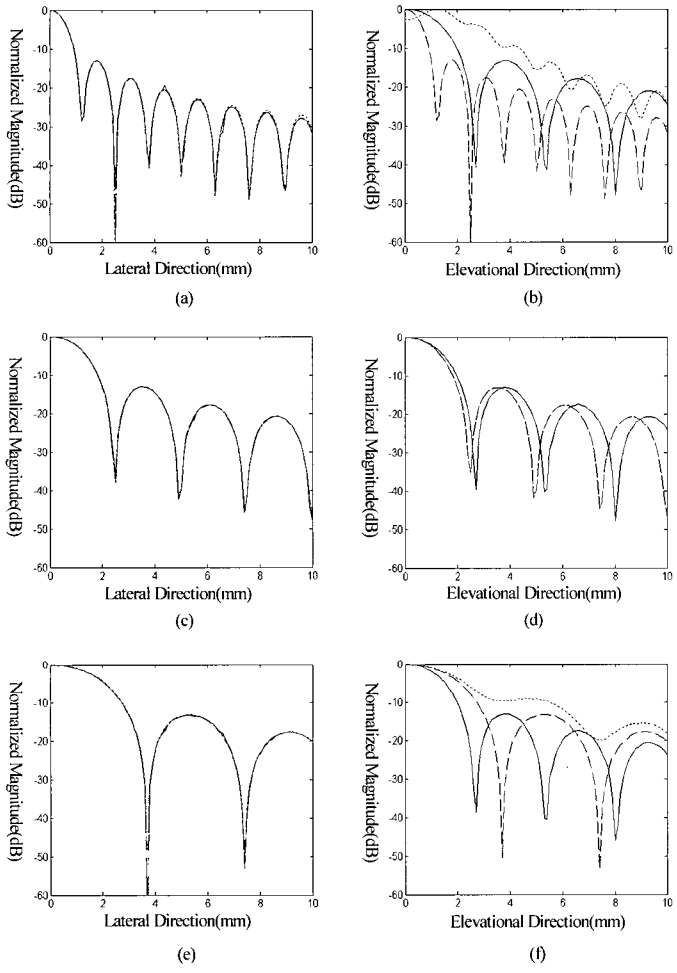
표 1의 마지막 열은 각 집속기법들의 볼륨 레이트를 나타낸 것이다. CA-FF 방법은 한번의 송수신으로 볼륨영상을 구성하는 한 프레임영상을 얻을 수 있기 때문에, 볼륨 레이트는 하나의 볼륨영상을 구성하는 프레임 수 N_e에 반비례하게 된다. 반면, CA-SA 방법은 사용하는 송신 변환자의 소자 수만큼 송수신 과정을 반복하여야 하므로 볼륨 레이트는 송신 변환소자 수 $(2N+1)$에 반비례하게 된다. 또한 CA-SA(LWF) 기법은 각기 다른 편향각도를 갖는 평면파의 송신 횟수 $(2L+1)$에 반비례하여 볼륨 레이트가 주어짐을 알 수 있다. 즉, 각각 65개의 변환소자로 이루어진 송수신 어레이로 이루어진 교차어레이를 사용하여 하나의 입체영상을 128개의 단면영상으로 구성한다고 가정할 때, CA-FF 방법은 128번의 초음파 송수신 과정이 필요한 반면에 제안한 CA-SA 방법은 송신 어레이 변환소자의 개수인 65번의 송수신만을 필요로 한다. 또한 CA-SA(LWF) 기법은 송신어레이의 구경크기와 관심깊이에 따라 최대 편향각도와 편향각도의 증분을 적절히 선택함으로써 입체영상을 위한 볼륨 레이트를 조절할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 CA-SA(LWF) 방법은 높은 송신전력과 고도방향 해상도를 갖는 고속의 실시간 3차원 영상 장치에 적합하다.

실험 결과 및 논의

제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 음장 모사실험(beam simulation)을 연속파(continuous wave)와 펄스파(pulsed wave) 신호를 사용하여 수행하였다. 모사실험을 위해 3.5MHz의 중심주파수에 측방향으로 65개의 변환소자를 갖는 수신어레이와 고도방향으로 15cm크기를 갖는 송신어레이로 이루어진 교차어레이를 사용하였다. 모든 모사실험은 본 논문의 수학적 해석 결과가 아닌 레일리 스칼라 회절 공식을 이용하여 실제 초음파 신호를 교차어레이를 이용하여 송신 및 수신 하는 경우를 모델링하여 수행하였

으며, 이때 매질 내 비선형성과 깊이에 따른 주파수 감쇄 현상은 무시하였다. 한편, 하나의 입체 영상을 얻기 위한 초음파 송수신 횟수는 65번으로 제한하였다. 따라서, 이때 최대 전파각도 β_{max}는 식 (11)과 최대 송수신횟수를 만족하도록 4.64^0로 정하였으며, 편향각도 증분 $\Delta\beta$는 식 (15)를 만족하도록 0.145^0로 설정하여 전체 송수신 횟수를 65번으로 하였다. 한편 동일한 송수신 횟수를 기준으로 하여 제안한 방법과의 비교를 위해 CA-FF, CA-SA 기법의 경우에는 측방향으로 65개, 고도방향으로 65개의 변환소자를 갖고 변환소자 간의 간격은 0.5λ인 65x65 교차어레이를 사용하였다.

그림 5는 연속파를 사용한 실험결과를 나타낸다. 그림 5에서 CA-FF 방법인 경우에는 송신 집속점을 80mm에 고정시키고 관찰깊이는 각각 40mm, 80mm, 120mm, 200mm, 280mm로 하였다. 또한 그림 5의 왼쪽 패널과 오른쪽 패널은 각각 측방향과 고도방향 빔패턴을 나타내며 각 그림에서 점선은 CA-FF 기법을, 쇄선은 CA-SA 기법을, 실선은 CA-SA(LWF)기법을 나타낸다.



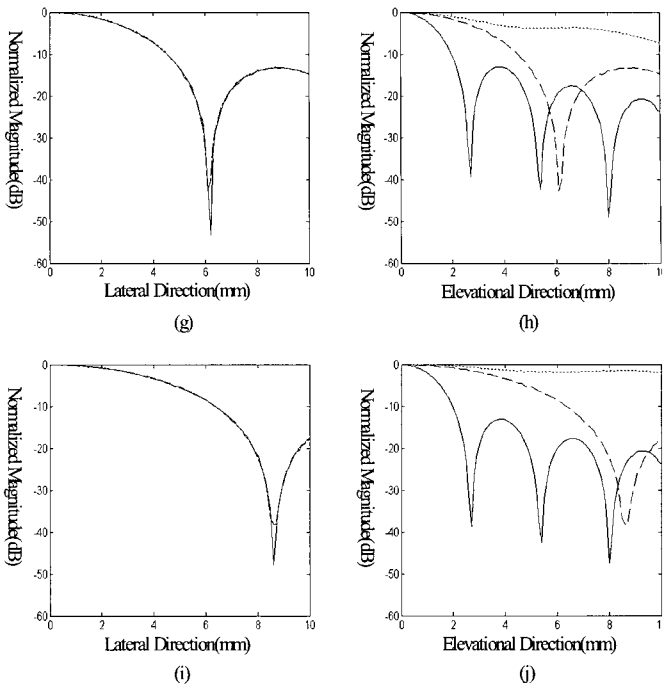


그림 5. CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법의 연속파 빔패턴 비교 : 40mm깊이에서의 측방향 빔패턴(a)과 고도방향 빔패턴(b), 80mm깊이에서의 측방향 빔패턴(c)과 고도방향 빔패턴(d), 120mm깊이에서의 측방향 빔패턴(e)과 고도방향 빔패턴(f), 200mm깊이에서의 측방향 빔패턴(g)과 고도방향 빔패턴(h), 280mm깊이에서의 측방향 빔패턴(i)과 고도방향 빔패턴(j)(점선: CA-FF 방법, 쇄선: CA-SA 방법, 실선: CA-SA(LWF) 방법).

Fig. 5. Comparison of CW beam patterns of CA-FF, CA-SA, and CA-SA(LWF): Lateral(a) and elevational(b) beam patterns at 40mm depth, lateral(c) and elevational(d) beam patterns at 80mm depth, lateral(e) and elevational(f) beam patterns at 120mm depth, lateral(g) and elevational(h) beam patterns at 200mm depth, and lateral(i) and elevational(j) beam patterns at 280mm depth(CA-FF: dotted line, CA-SA: dashed line, CA-SA(LWF): solid line).

그림 5(a)와 5(b)는 근거리인 40mm깊이에서의 빔시뮬레이션 결과를 나타낸다. 우선 CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 방법 모두 측방향으로의 동적집속으로 인해 측방향 해상도는 동일함을 알 수 있다. 하지만, 그림 5(b)의 고도방향 해상도를 살펴보면 기존의 CA-FF 방법은 집속점(80mm)에서 멀리 떨어져 있어 집속이 안 되고 빔폭이 넓게 퍼져있는 반면 CA-SA와 CA-SA(LWF) 기법은 측방향과 마찬가지로 합성구경집속을 통해 초음파 빔이 집속되어 있음을 알 수 있다. 또한, 근거리에서 CA-SA 기법의 고도방향 빔폭이 CA-SA(LWF) 기법에 비해 좁은 것을 알 수 있다.

그림 5(c)와 5(d)는 CA-FF 방법의 송신집속 깊이인 80mm에서의 결과를 나타낸다. 우선 측방향으로는 그림 5(a)와 마찬가지로 세 방법 모두 $\sin c(\cdot)$ 함수 형태의 집속된 빔패턴을 보여준다. 또한, 그림 5(d)에서 보듯이 고도방향으로도 그림 5(b)와 달리 CA-FF 방법 또한 CA-SA, CA-SA(LWF) 기법과 마찬가지로 집속된 형태의 빔패턴을 보여주는데, 이는 80mm 깊이가 CA-FF 방법의 송신집속 깊이이기 때문이다. 한편, 80mm깊이에서는 CA-SA(LWF)와 CA-SA 기법간의 해상도 차이가 40mm깊이에서 보다

작음을 알 수 있다.

그림 5(e)와 5(f)는 원거리인 120mm에서의 결과를 보여준다. 측방향으로는 그림 5(a), 5(c)와 같이 세 방법 모두 집속된 빔패턴을 보여준다. 하지만, 그림 5(f)의 고도방향 빔패턴을 살펴보면 본 논문에서 CA-SA, CA-SA(LWF) 방법은 동적 집속된 $\sin c(\cdot)$함수 형태의 빔패턴을 보여주는 반면, CA-FF 방법은 초음파 빔이 넓게 퍼져있는 것을 보여준다. 한편, 120mm깊이에서 40mm나 80mm 깊이에서와 달리 CA-SA(LWF) 기법의 고도방향 빔폭이 CA-SA 기법에 비해 좁은 것을 알 수 있다. 이는 CA-SA 기법은 관찰 깊이가 증가함에 따라 구면파의 회절현상으로 인해 해상도가 저하되는 반면, 제안한 CA-SA(LWF) 기법은 깊이에 관계없이 일정한 해상도를 제공하기 때문이다.

그림 5(g), 5(h)와 그림 5(i), 5(j)는 각각 200mm와 280mm에서의 빔패턴을 보여준다. 그림 5(a), 5(c), 5(e) 에서와 마찬가지로 측방향으로는 세 방법 모두 동일한 빔패턴을 보여준다. 한편 고도방향으로 살펴보면 본 논문에서 제안한 CA-SA와 CA-SA(LWF) 방법은 동적 집속된 $\sin c(\cdot)$함수 형태의 빔패턴을 보여주는 반면, CA-FF 방법은 초음파 빔이 넓게 퍼져있는 것을 보여준다. 특히, 원거리로 갈수록 CA-SA(LWF)와 CA-SA 기법간의 해상도 차이가 더욱더 커져 CA-SA(LWF) 기법의 해상도가 CA-SA 기법에 비해 월등히 우수한 것을 알 수 있다.

그림 5(c)에서 $\sin c(\cdot)$ 함수 형태로 주어지는 CA-FF 방법과 CA-SA 방법의 측방향 빔패턴과 CA-SA 방법(그림 5(d))의 고도방향 빔패턴에서 첫 번째 제로 점(null point)에 해당하는 빔폭은 표 1로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{Lat}^{S=}\frac{\lambda R_0}{(2M+1)d}=\frac{80\lambda}{65\cdot 0.5\cdot\lambda}=2.46mm \qquad (19)$$

마찬가지로 CA-SA(LWF) 기법의 고도방향 빔폭은 식 (9b)로 부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{Lat}^{L}=\frac{\lambda}{(2L+1)\Delta\beta}=\frac{0.44}{65\cdot(0.145*\pi/180)}=2.67mm \qquad (20)$$

실제로 그림 5(c)의 측방향과 그림 5(d)에서 CA-SF(LWF)의 고도방향 빔폭은 각각 2.5mm 와 2.7mm로 식 (19)과 (20)의 이론값과 거의 일치하여 본 논문의 해석결과와 일치함을 알 수 있다. 또한 이때 첫 번째 측엽값의 크기는 -13dB로 $\sin(\cdot)/\sin(\cdot)$함수의 이론적인 측엽값과 일치한다. 따라서 본 논문에서 무한송신구경을 가정하여 수행한 음장해석은 실제 유한구경 크기를 갖는 선형어레이를 이용했을 때에도 충분히 적용 가능함을 알 수 있다.

한편, 그림 5의 CA-SA(LWF)기법의 결과는 최대 해상도 영역인 송신어레이의 중심주사선에서의 빔패턴을 나타낸 것이다. 따라서 CA-SA(LWF) 기법의 최소 해상도 영역인 송신어레이의 경계 주사선에서의 해상도를 살펴보면 식 (13)에 나타내었듯이 식 (9b)의 빔폭보다 2배만큼 증가할 것이다. 이를 살펴보기 위해 송신어레이의 경계 주사선에서의 연속파 빔패턴을 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 결과에서 첫 번째 제로점에 해당하는 빔폭은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{Lat(e)}^{L}=\frac{\lambda}{(L+1)\Delta\beta}=\frac{0.44}{32\cdot(0.145*180/\pi)}=5.27mm \qquad (21)$$

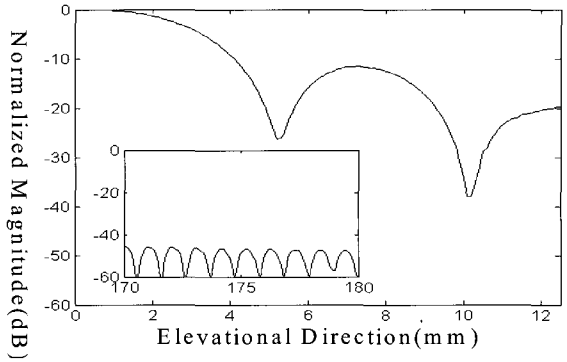


그림 6. CA-SA(LWF) 기법의 송신어레이 경계 주사선에서의 빔패턴.

Fig. 6. CW beam pattern of CA-SALWF) method at the edge scanline of the transmit array.

실제로 그림 6의 고도방향 빔폭은 5.25mm 로 식 (21)의 이론값과 일치함을 알 수 있다. 또한 그림 6 안의 작은 사각형의 그림은 이론적으로 그레이팅로브가 발생하는 식 (10)의 위치를 포함한 영역내의 빔패턴을 나타낸다. 실험결과에서 보듯이 모사실험에서는 그레이팅로브를 피하기 위해 식 (15)의 조건을 만족했기 때문에 그레이팅로브는 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

즉, 그림 5에서 측방향으로는 세 방법 모두 모든 깊이에서 동적 집속된 동일한 빔패턴을 제공함을 알 수 있다. 그러나 고도방향으로 살펴보면 CA-FF 기법은 송신 집속 깊이에서만 동적 집속된 빔패턴을 제공하는 반면, CA-SA와 CA-SA(LWF) 기법은 모든 깊이에서 동적 집속된 빔패턴을 제공함을 알 수 있다. 또한 CA-SA 기법은 관찰 깊이가 증가함에 따라 동적 집속된 빔패턴의 빔폭이 증가하는 반면, CA-SA(LWF) 기법은 제한적 회절 특성으로 인해 관찰 깊이에 상관없이 모든 깊이에서 동일한 빔폭을 갖는 집속된 형태의 빔패턴을 제공함을 알 수 있다.

이를 구체적으로 살펴보기 위해 그림 7에 10mm에서 300mm까지 관찰 깊이를 증가 시키면서 CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법의 측방향과 고도방향 빔폭을 -6dB를 기준으로 나타내었다. 그림 7(a)와 7(b)는 각각 측방향과 고도방향 빔폭을 나타내며, 그림에서 점선은 CA-FF, 쇄선은 CA-SA, 실선은 CA-SA(LWF) 기법을 나타낸다. 그림 7(a)를 살펴보면 측방향으로는 모든 기법이 동일한 빔폭을 가지는 것을 볼 수 있으며, 깊이가 증가함에 따라 초음파의 회절현상으로 인해 빔폭이 깊이에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 한편, 7(b)의 고도방향 빔폭을 살펴보면 CA-FF 기법은 송신집속점 부근에서만 좁은 빔폭을 제공하는 반면 CA-SA와 CA-SA(LWF) 기법은 모든 깊이에서 CA-FF 기법에 비해 좁은 빔폭을 제공하는 것을 알 수 있다. 또한 CA-FF와 CA-SA 기법은 초음파 회절 현상으로 인해 관찰 깊이에 비례하여 증가하는 빔폭을 제공하는 반면,

CA-SA(LWF) 기법은 제안한 기법의 제한적 회절 현상으로 인해 모든 깊이에서 동일한 빔폭을 제공함을 알 수 있다. 또한 CA-SA(LWF) 기법이 CA-SA 기법에 비해 고도방향으로 좁은 빔폭을 갖는 빔패턴을 제공하는 깊이는 식 (17)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_0 \geq \frac{d}{\Delta\beta} = \frac{0.22}{(0.145*\pi/180)} = 87mm \qquad (22)$$

실제로 그림 7(b)에서 CA-SA(LWF) 기법이 CA-SA 기법에 비해 좁은 빔폭을 갖는 최소깊이는 87.5mm로 본 식 (20)의 이론값과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

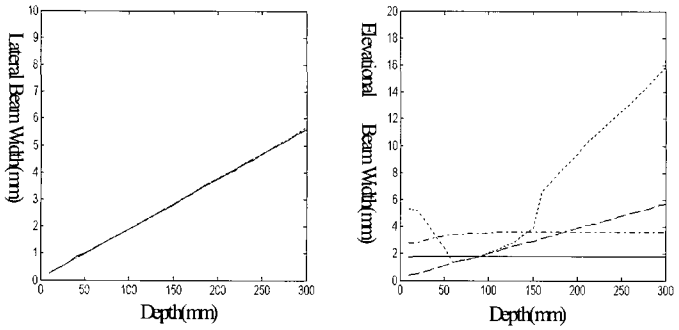


그림 7. CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법의 거리에 따른 측방향(a)과 고도방향(b) -6dB 빔폭(CA-FF: 점선, CA-SA: 쇄선, CA-SA(LWF)(송신어레이의 중심 주사선): 실선, CA-SA(LWF)(송신어레이의 경계 주사선: 점 쇄선).
Fig. 7. -6dB lateral(a) and elevational(b) beam widths of CA-FF, CA-SA, and CA-SA(LWF) methods(CA-FF: dotted line, CA-SA: dashed line, CA-SA(LWF)(center scanline of transmit array): solid line, CA-SA(LWF)(edge scanline of transmit array): dashed-dot line).

또한 그림 7(b)의 실선은 송신어레이 중앙에서의 해상도로 송신어레이 경계주사선에서의 해상도는 그림 7(b)의 실선에 비해 두 배 증가할 것이다. 이를 확인하기 위해 CA-SA(LWF) 기법에서 송신 어레이의 경계 주사선에서 나타나는 빔폭을 그림 7(b)에 점쇄선으로 표시하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 송신어레이의 경계 주사선에서의 빔폭은 중앙에서보다 두 배 증가하게 되며 이에 따라 CA-SA(LWF) 기법이 CA-SA 기법에 비해 좁은 빔폭을 제공하는 최소 깊이도 87mm에서 174mm로 늘어나게 된다. 따라서 CA-SA(LWF) 기법은 더욱 높은 SNR을 필요로 하는 원거리영상에 더욱 적합함을 알 수 있다.

그림 8은 펄스파를 사용했을 경우의 점대상체 실험결과를 나타낸다. 실험을 위해 점대상체를 각각 40mm부터 280mm까지 40mm간격으로 위치시키고 영상의 동적범위(dynamic range)는 40dB로 하였다 또한 앞의 실험과 동일하게 CA-FF 방법의 경우에는 송신 집속점을 80mm에 고정시켰다.

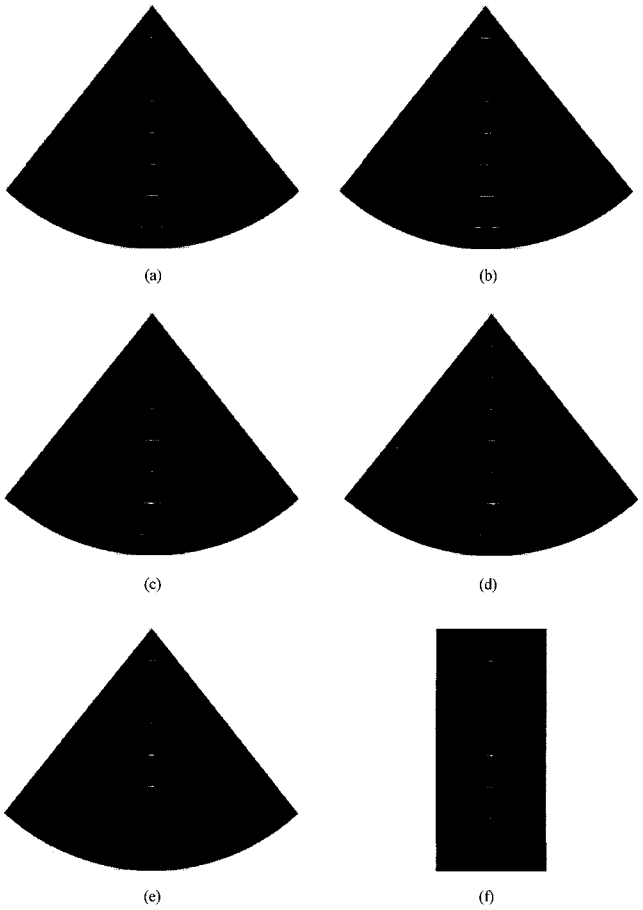
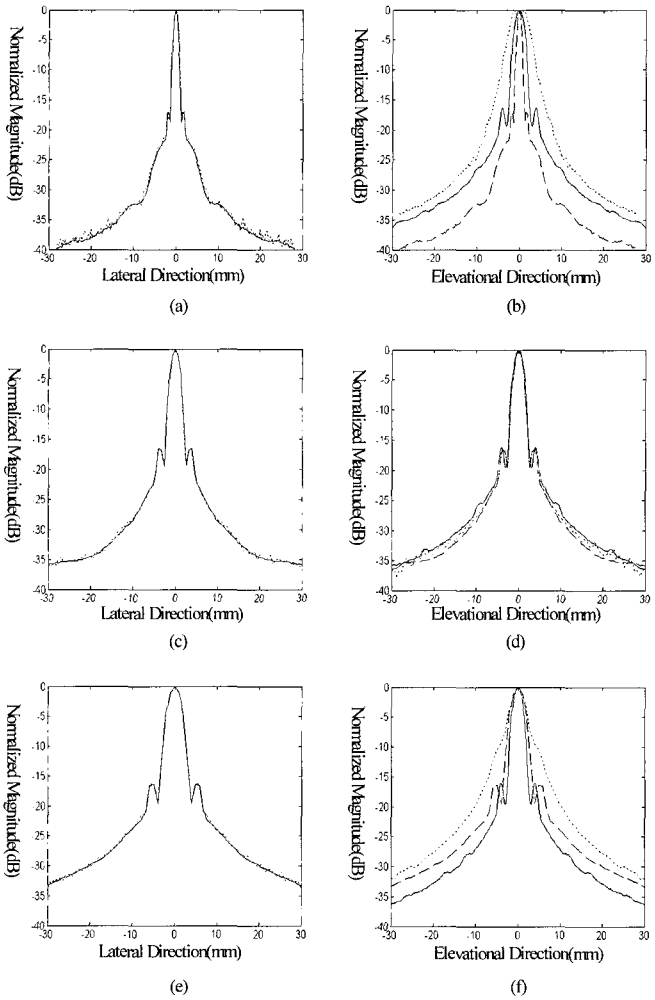


그림 8. CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 방법의 점대상체 모사실험 결과: CA-FF 방법의 측방향 빔패턴(a)과 CA-SA 방법의 고도방향 빔패턴(b), (c),(d) CA-SA 방법의 측방향 빔패턴(c)과 CA-SA 방법의 고도방향 빔패턴(d), CA-SA(LWF) 방법의 측방향 빔패턴(e)과 CA-SA(LWF) 방법의 고도방향 빔패턴(f).
Fig. 8. Simulation results of CA-FF, CA-SA, and CA-SA(LWF) for point targets: Lateral beam pattern(a) and elevation beam pattern(b) of CA-FF method, lateral beam pattern(c) and elevation beam pattern(d) of CA-SA method, and lateral beam pattern(e) and elevation beam pattern(f) of CA-SA(LWF) method.

그림 8(a), 8(c), 8(e)는 각각 CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법의 측방향 해상도를 나타낸다. 그림 7의 결과에서와 마찬가지로 측방향으로는 세 방법 모두 동적집속된 효과를 나타내므로 측방향 해상도는 동일함을 알 수 있다. 그림 8(b), 8(d), 8(f)는 각각 CA-FF, CA-SA, CA-SA(LWF) 기법의 고도방향 해상도를 나타낸다. 즉, 고도방향으로는 CA-SA 기법이 고도방향으로의 동적집속으로 인해 측엽이 감소하여 CA-FF 기법보다 보다 좁은 빔폭을 갖는 해상도를 제공함을 알 수 있다. 또한 CA-SA(LWF) 기법은 고도방향으로 깊이에 상관없이 균일한 해상도를 제공하여, 원거리에서 CA-SA 기법에 비해 훨씬 좁은 빔폭을 갖는 고도방향 해상도를 제공함을 알 수 있다. 한편, 그림 8(f)에서 보듯이 CA-SA(LWF) 기법은 송신어레이의 크기에 해당하는 영상영역을 제공하여 고도방

향으로 섹터형태의 영상영역을 제공하는 CA-FF, CA-SA 기법에 비해 다소 제한된 고도방향 영상을 제공한다. 하지만 그림 8(f)에서 고도방향으로의 영상영역은 15cm로 실제 인체 내를 관찰할 시에 커다란 제약조건이 되지 않는다.

이를 보다 정량적으로 살펴보기 위해 각 깊이에서의 측방향 및 고도방향 빔패턴을 그림 9에 나타내었다. 측방향 빔패턴을 나타내는 그림 9의 왼쪽 패널(그림 9(a),9(c),9(e),9(g),9(i))에서 볼 수 있듯이 측방향으로는 세 방법 모두 동일한 해상도를 보여준다. 하지만, 그림 9의 오른쪽 패널(그림 9(b),9(d),9(f),9(h),9(j)) 에서 볼 수 있듯이 고도방향으로는 CA-SA와 CA-SA(LWF) 방법이 기존의 CA-FF 방법에 비해 월등히 향상된 빔패턴을 보여주는 것을 알 수 있다. 특히 CA-SA 방법은 관찰 깊이가 증가함에 따라 집속된 고도방향 빔패턴의 빔폭이 증가하지만 CA-SA(LWF) 방법은 관찰 깊이에 관계없이 일정한 빔폭을 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안한 CA-SA(LWF) 기법은 CA-SA 기법에 비해 월등히 높은 송신전력과 원거리에서 월등히 향상된 고도방향 해상도를 제공하므로, 인체 내 깊은 곳을 관찰하기 위한 3차원 고속주사에 적합하다.



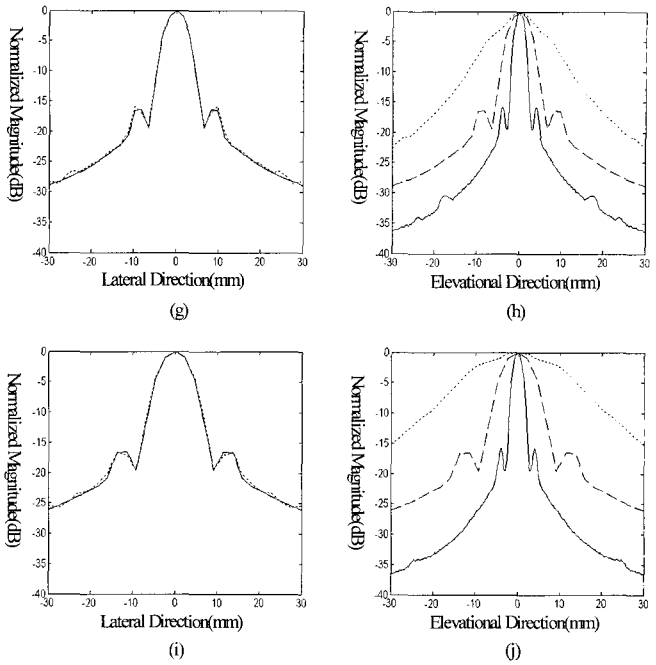


그림 9. 그림 8의 실험결과의 측방향 빔태턴과 고도방향 빔패턴 40mm깊이에서의 측방향(a)과 고도방향(b) 빔패턴, 80mm깊이에서의 측방향(c)과 고도방향(d) 빔패턴, 120mm깊이에서의 측방향(e)과 고도방향(f) 빔패턴, 200mm깊이에서의 측방향(g)과 고도방향(h) 빔패턴, 280mm깊이에서의 측방향(i)과 고도방향(j) 빔패턴(점선: CA-FF 방법, 쇄선: CA-SA 방법, 실선: CA-SA(LWF) 방법).

Fig. 9. Lateral and elevational beam patterns of Fig. 8: Lateral(a) and elevational(b) beam patterns at 40mm, lateral(c) and elevational(d) beam patterns at 80mm, lateral(e) and elevational(f) beam patterns at 120mm, lateral(g) and elevational(h) beam patterns at 200mm, and lateral(i) and elevational(j) beam patterns at 280mm(CA-FF: dotted line, CA-SA: dashed line, CA-SA(LWF): solid line).

결 론

본 논문에서는 선형파면과 합성구경 기법 기반의 교차어레이를 이용한 실시간 3차원 영상화 기법을 제안하였다. 우선, 본 논문의 동반논문에서 제안한 구면파를 이용한 합성구경 집속 기법은 모든 깊이에서 고도방향으로의 동적집속된 빔패턴을 제공하지만 송신시 하나의 배열소자를 이용하여 구면파를 송신하므로 송신전력은 제한되며, 음파의 회절현상으로 인해 관찰 깊이가 증가함에 따라 빔폭이 증가하는 단점을 갖는다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 송신시 수평평면에 대해 각기 다른 편향각도를 갖는 선형파면을 송신하는 선형파면 기반의 합성구경 집속기법을 제안하였다. 선형파면 기반의 합성구경 기법은 구면파 기반의 합성구경 기법과는 달리 영상깊이에 관계없이 고도방향으로 동일한 해상도를 제공하는 제한회절 특성을 가지는 것을 음장해석을 통해 확인하였다. 이때 고도방향 빔폭은 송신시 사용한 선형파면의 전체 편향각도에 반비례하여 주어진다. 한편 15cm의 송신어레이와 65개의 변환소자로 이루어진 교차어레이와 3.5MHz의 중심주파를 갖는 연속파를 사용하여 선형파면의 송신 각도를 -4.64^{o}부터 4.64^{o}까

지 0.145°간격으로 했을 때 제안한 방법은 65번의 송수신 과정을 통해 관심영역에서 고도방향으로 최소 2.7mm에서 최대 5.25mm까지의 빔폭을 갖는 집속된 형태의 빔패턴을 제공함을 확인하였다. 또한 선형파면 기반의 합성구경 기법은 구면파 기반의 방법과는 달리 송신시 송신어레이의 전체 구경을 이용하여 초음파를 송신하므로 구면파 기반의 방법에 비해 우수한 SNR을 갖는 영상을 제공한다. 모사실험 결과 제안한 방법은 원거리에서는 구면파 기반의 방법과 비교하여 월등히 향상된 고도방향 빔폭을 제공함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 선형파면 기반의 교차어레이를 이용한 실시간 3차원 영상화 기법은 높은 SNR과 고도방향으로 고해상도를 갖는 원거리 3차원 영상을 위한 고속주사에 매우 적합하다고 말할 수 있다.

한편, 본 논문에서 제안한 방법은 하나의 주사선을 구성하기 위해 여러개의 부구경 신호들을 이용하는 합성구경 기법을 기반으로 하기 때문에 빠르게 움직이는 대상체를 관찰하기 위해서는 움직임 결함을 극복하여야 한다[21-23]. 하지만 1차원 어레이를 사용한 경우에 측방향 움직임 결함 문제는 효율적으로 해결할 수 있다는 사실이 실험적으로 이미 검증되었다[22]. 이러한 방법은 여러개의 부구경 신호 사이의 상관관계로부터 움직음을 추정, 보상하므로 2차원 교차어레이에서도 적용가능할 것이며 현재 이에 대한 연구가 진행 중이다.

참 고 문 헌

1. A. Macovski, "*Medical Imaging Systems*", Prentice Hall, pp. 73-224, 1983
2. A.Fenster and D. B. Downey, "*3-D ultrasound imaging: A Review*", IEEE Eng. Med., vol. 15, pp. 41-51, Nov. 1996
3. S.W. Smith, H.E. Pavy, and O. T. von Ramm, "*High-speed ultrasound volumetric imaging system-part I: Transducer design and beam steering*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 38, no. 2, pp. 100-108, 1991
4. O. T. von Ramm, S.W. Smith, and H.E. Pavy, "*High-speed ultrasound volumetric imaging system-part II: Parallel processing and image display*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 38, no. 2, pp. 109-115, 1991
5. J.T. Yen, and S.W. Smith, "*Real-Time Rectilinear Volumetric Imaging*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 49 no. 1, pp. 114-124, 2002
6. J.T. Yen, J.P. Steinberg, and S.W. Smith, "*Sparse 2-D array design for real-time rectilinear volumetric imaging*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 47, no. 1, pp. 93-110, 2000
7. T.K Song and S.H. Chang, "Method and apparatus for forming ultrasonic three-dimensional images using cross array", U.S. patent 5,901,708, 1999
8. S.S. Brunke and G.R. Lockwood, "*Broad-bandwidth radiation patterns of sparse two dimensional vernier arrays*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 44, no. 5, pp. 1101-1109, 1997
9. D.H. Turnbull and F.S. Foster, "*Beam steering with two-dimensional Transducer arrays*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 38, no. 4, pp. 320-333, 1991
10. M. Mooney, "Ultrasound trasducer for three-dimensional imaging", U.S. patent 6,102,860, 2000
11. A. Austeng and S. Holm, "*Sparse arrays of real-time 3D imaging, simulated and experimental results*", Proc. IEEE Ultrason. Sym., 2000
12. G.R. Lockwood and F.S. Foster, "*Optimizing the radiation pattern of sparse periodic two-dimensional arrays*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 43, no. 1, pp. 15-19, 1996
13. L.J. Busse, "*Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 39 no. 2, pp. 174-179, 1992
14. J.T. Yen and S.W. Smith, "*Real-time curvilinear and improved rectilinear volumetric imaging*", Proc. IEEE Ultrason. Sym., pp. 1117-1122, 2000.
15. Jian-yu Lu, "*2D and 3D high frame rate imaging with limited diffraction beams*", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 44, no. 4, pp. 839-856, July, 1997
16. G. R. Lockwood, J.R Talman and S.S. Brunke, "*Real-time 3-D ultrasound imaging using sparse synthetic aperture beamforming*", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 45, no. 4, pp. 980-988, July, 1998
17. Method and apparatus for forming ultrasonic three-demensional images using cross array, 특허번호 5,901,708,1999
18. M. K. Jeong, T. K. Song and S. B. Park, "*Generation of Sinc Wave by a One-Dimensional Array for Applications in Ultrasonic Imaging*", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., vol. 43, no. 2, pp. 285-295, March, 1996
19. 장진호, 송태경, "*선형파면을 이용한 새로운 합성구경 기법*", 대한의공학회지, 제22권, 제4호, pp. 320-330, 2001
20. 송태경, "*초음파 선형주사 영상을 위한 합성구경 기법의 해석 및 응용*", 대한의공학회지, 제 20권, 제 4호, pp. 503-513, 1999
21. M. Karaman, H. Ş. Bilge, and M. O'Donnell, "*Adaptive Multi-element Synthetic Aperture Imaging with Motion and Phase Aberration Correction*", IEEE Trans. UFFC, vol. 45, no. 4, pp. 1077~1087, 1998
22. L. F. Nock and G. E. Trahey, "*Synthetic receive aperture imaging with phase correlation for motion and for tissue ininhomogeneities - Part II: Effects of and correction for motion*", IEEE Trans. UFFC, vol. 39, no. 4, pp. 496-501, 1992
23. 김강식, 황재섭, 정종섭, 송태경, "*초음파 합성구경 영상을 위한 효율적인 움직임 추정 및 보상 기법*", 대한의공학회지, 제23권, 제2호, pp. 87-99, 2002