

초음파 영상시스템에서 카이저 윈도우를 이용한 사이드 로브 감축에 관한 연구

나병윤·안영복*·정목근**

= Abstract =

A Study on Sidelobe Reduction Using Kaiser Window in Ultrasonic Imaging System

Byeong-Yoon Na, Young-Bok Ahn*, Mok-Kun Jeong**

In this paper, we compared the performance of the Kaiser window with those of others as a weight function of well known apodization technique for regression of side lobe in a field pattern resulted from focusing of transducer array. The Kaiser window is an window providing many types of curve with several variables. In order to compare performance of the Kaiser window as the weight function, apodization results of the previously used Hamming window function and the Matched Gaussian function are compared. Result of computer simulation, the performance of Kaiser window with $\delta=0.0025$ in side lobe regression was better than that of Hamming window or Matched Gaussian function.

Key words : Apodization Kaiser window, Side lobe, Computer simulation

요 약

본 논문에서는 트랜스듀서 어레이의 집속에 의해 생성되는 필드패턴에서 사이드 로브 감축을 위한 기술로 잘 알려진 apodization의 가중 함수로써 카이저 윈도우의 성능을 다른 윈도우 들과 비교하였다. 카이저 윈도우는 몇몇 변수로 여러가지 형태의 모양을 제공하는 윈도우이다. 가중 함수로써 카이저 윈도우의 성능을 비교하기 위하여, 기존에 사용되고 있는 헤밍 윈도우 함수와 정합 가우시안 함수의 apodization 결과가 비교되었다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과, 사이드 로브 억제면에서 δ 값이 0.0025인 카이저 윈도우의 성능이 헤밍 윈도우나 정합 가우시안 함수의 성능보다 더 우수했다.

서 론

초음파는 인체에 대한 해가 없으며 인간의 생체조직을

진단용으로 영상화하거나 태아의 발육상태를 모니터 상에 표시하는 의료 진단용으로 널리 사용되고 있다. 초음파 영상은 피부나 인체조직의 밀도와 같은 특성에 따라 변하는 반사신호를 검출하여 구성되므로 기존의 다른 진단장치보다 간편하게 조직의 내부 구조를 관찰할 수 있다. 그러나 초음파의 반사영상은 초음파의 간섭이나 회절특성으로 인하여 해상도가 떨어지는 단점이 있다. 해상도를 저하시키는 주된 원인으로는 필드패턴에서 나타나는 사이드 로브와 그레이팅 로브들이 있다. 사이드 로브들은 초음파 영상내에서 영상이 흐려지게 되는 주요 원인이 되며, 그레이팅 로브들은 영상내에서 스펙클이나 허상과 같은 잡음으로 나타나게 된다^{3,4)}.

초음파의 필드패턴에서 이러한 사이드 로브와 그레이팅 로브를 제거하는 것이 초음파 영상의 해상도를 개선하는 방법으로 알려져 있다. 특히 사이드 로브를 억제시킬 수 있는 방법으로 apodization이 많이 사용되고 있다. 이 방법은 조직을 통하여 전파하는 초음파가 한 점에서 집중될

건국대학교 전자공학과

Department of Electronic Engineering, Konkuk University

*건국대학교 전자공학과

*Department of Electronic Engineering, Konkuk University

**대전대학교 전자공학과

**Department of Electronic Engineering, Daejin University

통신저자 : 나병윤, (143-701) 서울시 광진구 93-1, Tel. (02)450-3071 Fax. (02)450-3488

때, 집중된 영역에서 필드패턴이 트랜스듀서의 기하학적 모양이 Fourier 변환된 형태로 나타난다는 성질을 이용한다^{2,6)}. 일반적으로 apodization은 트랜스듀서의 모양이 사각형으로 이루어진 선형 트랜스듀서에서 사용되며, 각 소자들에서 수신되는 신호에 가중치를 적용하여 트랜스듀서의 기하학적 패턴을 바꾸게 된다. 이러한 apodization에 사용되는 가중함수로는 해밍(Hamming), 헤닝(Hanning)과 같이 사이드 로브 억제의 효과를 갖는 윈도우 함수가 많이 사용된다.

윈도우 함수들 가운데 가장 성능이 우수하다고 알려져 있고, 초음파 영상 장치에서 주로 사용되고 있는 가중함수는 해밍 윈도우다. 해밍 윈도우는 다른 윈도우 함수들에 비하여 주파수 영역에서 사이드 로브의 크기가 상대적으로 가장 작게 나타나기 때문이다. 그리고 apodization을 위하여 발표되었던 가중함수인 정합 가우시안 함수가 있는데, 이 함수의 결과를 살펴보면 메인 로브와 가장 인접한 사이드 로브는 다른 함수들에 비하여 아주 작은 크기로 나타났으며, 전반적인 사이드 로브들은 8-10dB의 균일한 억제효과를 보여주고 있다²⁾.

본 논문의 목적은 초음파 영상 장치의 측면 해상도를 개선하는 방법들 가운데 하나인 apodization의 가중함수로써 카이저 윈도우 함수의 성능을 해밍 윈도우나 정합 가우시안 함수등과 같은 가중함수들과 비교·분석하여 카이저 윈도우를 사용하였을 경우, 더욱 향상된 측면 해상도를 얻을 수 있음을 제시하는 데 있다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해밍 윈도우와 정합 가우시안 함수의 apodization 결과를 카이저 윈도우의 결과와 함께 제시하였다.

본 논문의 전반적인 구성을 살펴보면, II장에서 초음파 영상장치의 개념을 간단히 소개하였고, III장에서는 선형 트랜스듀서에 의한 필드패턴 및 apodization 기술과 가중함수로 제안된 카이저 윈도우 함수를 설명하였다. 그리고 IV장에서는 본 논문에서 언급했던 내용들에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 그림들과 함께 제시하였으며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺었다.

초음파 영상장치

1. 반사 영상

초음파 영상장치에 사용되는 트랜스듀서는 단지 전송모드나 수신모드에서만 동작하는 광학 장치와는 달리 송신과 수신 모드에서 동시에 동작하게 되며, 음파를 송·수신하기 위하여 압전 트랜스듀서가 사용되고 있다. 초음파 영상시스템에서 기본적인 반사 영상장치는 그림 1과 같다.

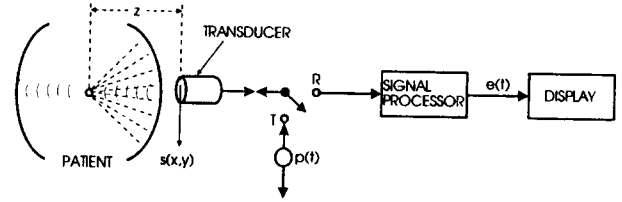


그림 1. 기본적인 반사 영상장치
Fig. 1. Basic reflection imaging system

그림에서 스위치가 전송(T)의 위치에 있을 때, 펄스 $p(t)$ 는 트랜스듀서를 여기시키며, 매질에 입사되는 파두면은 그림의 실선으로 보여지고 있다. 펄스 전송후, 스위치는 수신 위치로 놓이게 되며, 입사된 파형이 불연속적인 점(산란체)에 충돌하게 되면, 반사파가 점선의 방향으로 생성된다. 산란된 파는 동일한 트랜스듀서에 의하여 수신되어 필터링(filtering), 이득 제어(gain control), 포락선 검출(envelop detection)등의 처리과정을 거쳐서 모니터 상에 출력된다.

인체에 대하여 초음파가 균일한 속도 c 로 송·수신되며, 감쇄 계수 α 로 균일하게 감쇄한다고 가정하고, 인체를 반사율 $R(x,y,z)$ 을 갖는 균일한 산란체의 배열처럼 모델화한다면, 수신 신호는 식 (2-1)과 같다¹⁾.

$$e(t) = k \left| \int \int \int \frac{e^{-2\alpha z}}{z} R(x,y,z) s(x,y) \tilde{p}\left(t - \frac{2z}{c}\right) dx dy dz \right| \quad (2-1)$$

식 (2-1)에서 k 는 정규화 상수, $e^{-2\alpha z}$ 는 왕복거리 $2z$ 에 대한 초음파의 감쇄를 의미한다. 또한 $s(x,y)$ 는 트랜스듀서 표면의 형태를 나타내는 함수이며, 초음파 영상에서 측면해상도를 결정하는 주요 인자가 된다. $\tilde{p}(\cdot)$ 는 왕복 시간 $2z/c$ 에 의한 시간 지연을 갖고 다양한 처리과정에 의하여 수정되는 수신 펄스이다. 그리고 절대값은 포락선 검출을 나타낸다¹⁾.

2. B-모드 영상 (Brightness mode image)

초음파 영상장치에서 B-모드는 피사체의 이차원적인 횡단면 반사영상을 제공한다. 그림 2는 상업적인 초음파 B-모드 영상장치의 블록도이다. B-모드 영상의 해상도에는 트랜스듀서의 이동 방향에 대한 측면 해상도와 초음파 펄스의 입사 방향에 대한 축(axial:깊이) 해상도등 두가지가 있다. 이 가운데 측면 해상도는 초음파의 파장 λ 와 트랜스듀서 소자들의 수치적인 구경으로 식(2-2)과 같이 결정된다³⁾.

$$\delta = \frac{1.22\lambda F}{D} \quad (2-2)$$

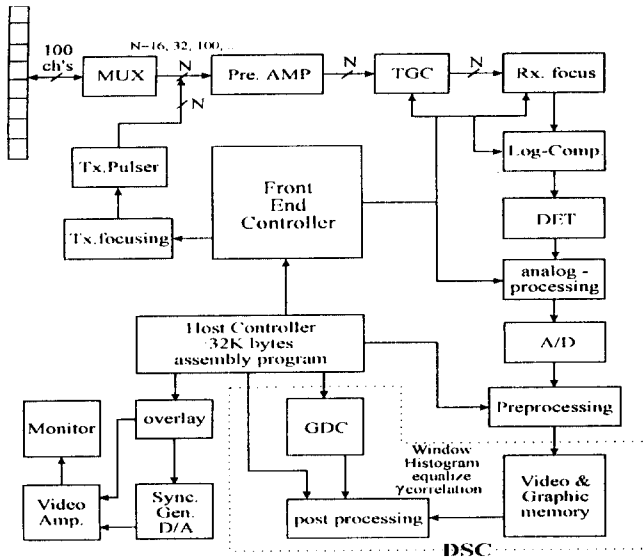


그림 2. 상업적인 초음파 B-모드 영상장치의 블럭도
Fig. 2. Block diagram of the conventional ultrasonic B-mode imaging system

위식에서 F는 초음파 빔의 초점 길이, D는 트랜스듀서의 구경이다.

B-모드 영상에서 축방향 해상도는 순차적으로 반사되는 음향 펄스의 도달 시간으로부터 결정된다. 해상도는 펄스의 밴드폭에 의해 주로 결정되지만, 넓은 밴드폭을 갖는 신호는 식 (2-2)에서 볼 수 있듯이, 측면해상도에 영향을 주기 때문에 밴드폭을 임의로 넓게 사용할 수는 없다. 또한 구경이 커질수록 초점에서의 해상도는 증가하지만, 초점 이외의 부분에서는 좋지 못한 영향을 미치게 된다. 이와 같은 환경에서 채널의 수가 많은 경우 깊이 해상도를 위해 수신모드에서 동적집속이 이루어지고 있으며, 측면의 해상도를 위해서는 사이드 로브, 그레이팅 로브 억제에 관한 다양한 방법들이 제공되고 있다^{3,5)}.

선형 트랜스듀서와 Apodization

1. 선형 트랜스듀서의 필드 패턴

초음파 영상 진단장치에서는 여러가지 모양의 트랜스듀서를 사용하여 다양한 형태의 영상을 제공하지만, 본 논문에서는 apodization이 사용되는 선형 트랜스듀서만을 고려한다. 일반적으로 선형 트랜스듀서는 초음파를 한 점에 집중하기 위하여 제어가 가능한 지연소자들을 사용하고 있다. 트랜스듀서 어레이의 기하학적 구조는 그림 3과 같다.

그림 3에서 선형 트랜스듀서 어레이의 모양을 수식적

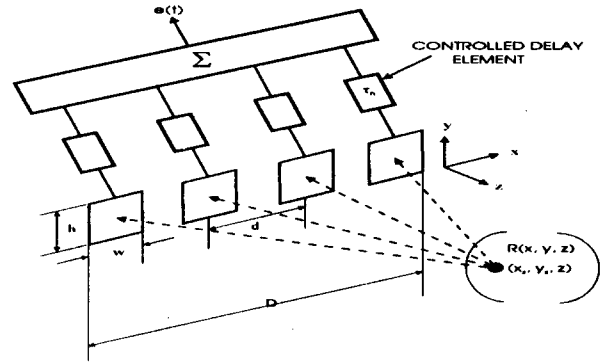


그림 3. 선형 어레이를 이용한 영상 장치
Fig. 3. Basic reflection imaging system using linear arrays

으로 표현하면 전체 트랜스듀서와 개별 소자들을 사각형의 rect함수로 표현할 수 있으므로 식 (3-1)과 같이 유도될 수 있다¹⁾.

$$s(x,y) = \left[\text{rect} \left(\frac{x}{D} \right) \text{comb} \left(\frac{x}{D} \right) * \text{rect} \left(\frac{x}{w} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{y}{h} \right) \quad (3-1)$$

위식에서 D는 트랜스듀서 어레이의 전체 크기, w는 개별적인 어레이 소자들의 폭, 그리고 d는 소자들간의 거리를 의미하며, h는 각 소자의 높이를 나타낸다. 또한 comb함수와 컨볼루션은 d간격으로 위치한 개별적인 트랜스듀서의 패턴을 나타내며, 전체적인 폭은 $\text{rect}(x/D)$ 로 정의되었고, 트랜스듀서의 높이는 $\text{rect}(y/h)$ 로 정의되었다. $\text{comb}(\cdot)$ 함수와 $\text{rect}(\cdot)$ 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{comb} \left(\frac{x}{D} \right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{x}{D} - n \right)$$

$$\text{rect} \left(\frac{x}{D} \right) = \begin{cases} 1 & ; |x| < \frac{D}{2} \\ 0 & ; |x| > \frac{D}{2} \end{cases}$$

이러한 형태의 트랜스듀서를 이용하여 한점에 대한 필드 패턴을 구하면 식(3-2)와 같다.

$$h(x_z, y_z) = e^{i\omega t} \left[\frac{D}{2} \text{sinc} \left(\frac{Dx_z}{\lambda z} \right) * \text{dcomb} \left(\frac{dx_z}{\lambda z} \right) \right] w \text{sinc} \left(\frac{x_z w}{\lambda z} \right) \times \left[\text{rect} \left(\frac{y_0}{h} \right) * \exp \left(i \frac{k y_0^2}{2z} \right) \right] \quad (3-2)$$

그리고 다음과 같은 관계를 이용하면,

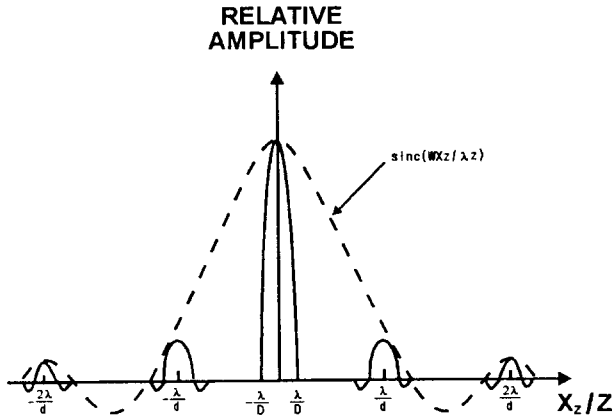


그림 4. 선형 어레이의 원거리(FAR) 필드패턴
Fig. 4. Far-field pattern of a linear array

$$d\text{comb} \left(\frac{dx_z}{\lambda z} \right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta \left(\frac{x_z}{\lambda z} - \frac{n}{d} \right) \quad (3-3)$$

식 (3-3)을 얻을 수 있게 된다.

$$h(x_z, y_z) = e^{i\alpha} \frac{Dw}{z} \left\{ \sin c \left(\frac{x_z w}{\lambda z} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sin c \left[D \left(\frac{x_z}{\lambda z} - \frac{n}{d} \right) \right] \right\} \times \left[\text{rect} \left(\frac{y_0}{h} \right) * \exp \left(i \frac{ky_0^2}{2z} \right) \right] \quad (3-4)$$

식(3-4)에서 우측에 곱해지는 항은 y축(어레이 소자들의 높이)에 대한 패턴과 z축 즉, 깊이에 대한 위상인자를 나타내는 것이다. 그런데 트랜스듀서 소자의 높이, 즉 y축은 초음파의 필드패턴을 근사적으로 해석하는 분야에서는 고려되지 않고 있으며, 따라서 식(3-4)에 의하여 나타나게 되는 필드패턴은 다음의 그림 4와 같은 형태를 갖는다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 필드패턴은 개별적인 소자들과 트랜스듀서의 전체적인 구조의 Fourier 변환 결과가 조합된 형태를 이루고 있다^{1,4)}. 중심축을 기준으로 $-\lambda/D$ 와 λ/D 사이에는 메인 로브는 트랜스듀서의 전체 크기인 D 가 커질 수록 폭이 좁아지게 되며, λ/d 의 간격으로 발생하게 되는 그레이팅 로브는 개별적인 소자들 간의 간격 d 가 작아질 수록 멀어 지게 된다. 또한 파장이 작아질 수록, 다시 말하면 중심 주파수의 크기가 커질 수록 메인 로브에 대한 해상도는 향상되는 경향이 있게 된다. 그렇지만, 일반적으로 사용되고 있는 초음파 영상장치에서는 d 를 무한정 작게 할 수 없으며, 파장의 길이 또한 어느 수준까지는 작게 할 수 없다. 점선으로 나타난 파형은 식 3-4에서 함수 $\text{sinc}(x_w/\lambda z)$ 에 의한 결과이다.

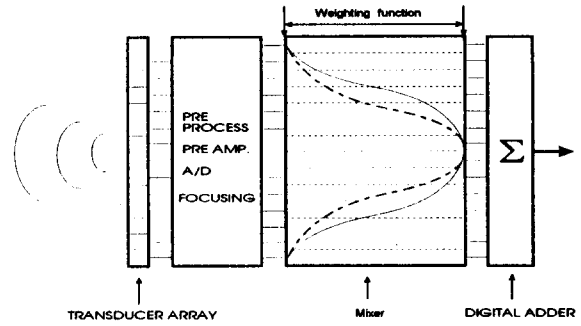


그림 5. Apodization의 방법
Fig. 5. Method of Apodization

2. Apodization

필드패턴이 어레이의 기하학적 구조에 대한 Fourier 변환 형태로 나타나게 된다는 이론에 근거를 두고, apodization은 필드 패턴내에 존재하는 사이드 로브를 제어할 수 있는 간단하면서도 효율적인 방법으로 알려져 있다. 선형 트랜스듀서의 경우, 트랜스듀서는 직사각형 모양을 이루고 있으므로 rect함수로 표현된다. 이러한 기하학적 모양의 Fourier 변환은 sinc함수가 되므로 사이드 로브는 크게 나타나게 된다. 따라서 반사되어 수신되는 신호에 적절한 가중 함수를 적용하여 소스의 분포를 적절히 조절하게 된다. 그림 5는 Apodization을 초음파 영상장치에 적용하는 방법을 나타내고 있다.

이러한 apodization의 과정을 수식적으로 표현하면, 다음 식(3-5)로 표현된다.

$$\tilde{s}(x, y) = s(x, y)h(x) \quad (3-5)$$

위식에서 $s(x, y)$ 는 원래의 소스분포내에 apodization 가중 함수가 포함된 것을 의미한다. 결과적으로 기대되는 필드패턴은 Fourier 변환의 컨벌루션 형태로 식(3-6)과 같이 표현된다.

$$\mathcal{F}\{\tilde{s}(x, y)\} = \mathcal{F}\{s(x, y)\} * \mathcal{F}\{h(x)\} \quad (3-6)$$

3. Apodization 가중 함수

일반적으로 사용되는 가중 함수에는 헤밍, 헤닝 윈도우 등이 있으며, 사용되는 펄스의 포락선이 가우시안 형태이기 때문에 집속된 필드 패턴이 가우시안 형태를 이루고 있다는 점에 근거를 두고서 제안된 정합 가우시안 함수가 있다. 이 가운데 정합 가우시안 함수는 다음 식들로 표현된다²⁾.

$$A_i = A(x = 0, y = y_i) \quad (3-7)$$

$$A(x, y) = A(x) \exp\left[\left(\frac{y}{w_a}\right)^2\right] \quad (3-8)$$

위의 식에서 w_a 는 가우시안 파형의 빔폭을 의미하며, 이것은 다음의 식 (3-9)와 같다.

$$w(z) = 0.092 \frac{D}{K_0} \sqrt{1 + 22.46 K_0^2 \left(\frac{z}{F}\right)^2} \quad (3-9)$$

식 (3-9)에서 K_0 는 집속의 강도를 결정하기 위하여 제안된 매개변수이며, 다음의 식 (3-10)으로 정의된다.

$$K_0 = \frac{D^2}{2F\lambda} \quad (3-10)$$

위의 식들에서 D 는 트랜스듀서의 크기, F 는 초점 거리, z 는 깊이, λ 는 파장을 의미한다. 이와 같이 정합 가우시안 가중함수는 집속의 강도변화에 적응하도록 구성되어 있다. 즉, K_0 값이 1보다 크면 강한 집속이고, 작으면 약한 집속을 의미하며, 이 값에 따라 가중함수의 패턴도 변하게 된다.

초음파 영상장치에서 Apodization의 가중함수는 헤밍 윈도우 함수가 가장 많이 사용되고 있으며, 수식으로 표현하면, 식 (3-10)과 같다.

$$w[n] = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/M), & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-11)$$

위식에서 M 은 전체 샘플의 수, 즉 윈도우의 크기를 의미한다. 초음파 영상 시스템에서 채널의 수와 M 의 크기는 동일하다. 즉, 사용되는 채널의 수가 많아지면 그만큼 가중 함수로 사용되는 윈도우의 크기는 넓어지게 되는 것이다.

4. 카이저 윈도우

카이저 윈도우는 변수를 적절히 조절하여 여러가지 모양의 윈도우를 표현할 수 있으며, 수식적인 정의는 다음과 같다.

$$w[n] = \begin{cases} I_0[\beta(1 - [(n-a)/a]^2)^{1/2}], & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-12)$$

위식에서 $a=M/2$ 이고, $I_0(\cdot)$ 는 베셀 함수이다. 카이저 윈도우의 매개변수로는 윈도우의 길이 ($M+1$)과 다음식으로 주어지는 shape 변수 β 가 있다.

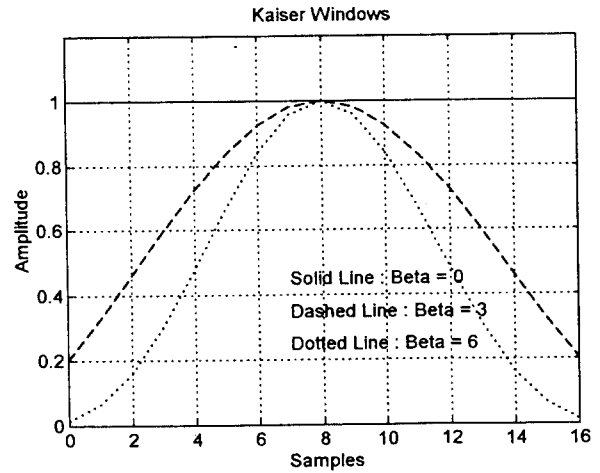


그림 6. β 값이 다를 때 카이저 윈도우의 모양
Fig. 6. Shapes of Kaiser windows when value of β is different

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(A-8.7), & A > 50, \\ 0.5842(A-21)^{0.4} + 0.07886(A-21), & 21 \leq A \leq 50, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-13)$$

위식에서

$$A = -20 \log_{10} \delta \quad (3-14)$$

식(3-14)에서 δ 값은 윈도우의 주파수 응답에서 피크 근사화 오차(peak approximation error : ripple)를 의미하며, 윈도우의 모양을 결정하는 β 값을 선택하기 위하여 존재한다. 즉, δ 값이 작을 수록 β 는 커지게 되고, 이로 인하여 윈도우의 모양은 보다 좁은 형태가 된다. 그림 6에서 β 값에 따른 카이저 윈도우의 모양을 나타내었다.

컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

1. 시뮬레이터의 사양

본 시뮬레이션에서는 초음파 감쇄효과는 고려하지 않았다. 일반적으로 초음파 펄스의 포락선은 식 (4-1)과 같다.

$$p(t) = \exp[-(w_0 t / \sigma)^2] \quad (4-1)$$

주어진 식에서 σ 는 펄스의 폭(variance), w_0 는 펄스의 중심 주파수를 의미하며, 본 시뮬레이션에서는 각각 2.5π 와 3.5MHz 가 사용되었다. 그림 7은 중심 주파수가 w_0 이고, 식 (4-1)과 같은 포락선을 갖는 초음파 펄스의 모양이다.

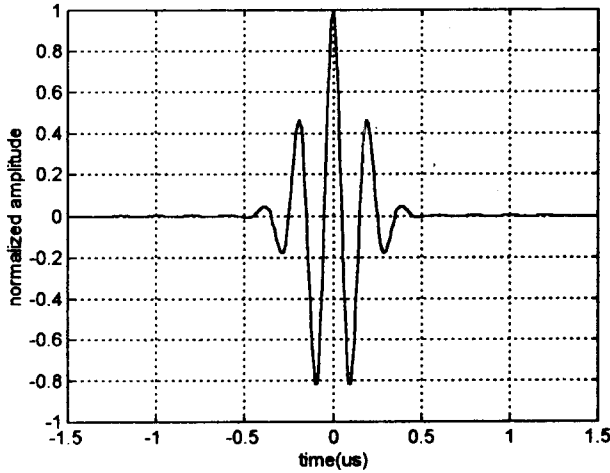


그림 7. 초음파 펄스의 모양
Fig. 7. Shape of ultrasonic pulse

2. 시뮬레이터의 기하학적 구조

본 논문에서 사용된 시뮬레이터는 초음파 영상장치에서 사용되는 여러가지 트랜스듀서들 가운데 선형 트랜스듀서를 기반으로 어레이의 기하학적인 구조를 C언어로 제작한 것이다. 시뮬레이터는 사용되는 펄스의 중심 주파수 및 반사체의 갯수, 필요한 초점의 위치, 갯수, 그리고 범위 등 여러 가지 매개변수를 설정하여 모의 실험할 수 있도록 구성되었다. 시뮬레이터에서 초음파를 집중하는 방법은 임의의 한점 (X, Z)를 기준으로 전송 거리 T, 및 수신 거리 R를 고려하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

일반적으로 초음파 영상 장치의 트랜스듀서는 순차적으로 모든 채널에서 초음파 펄스를 송신하고 동시에 반사파를 수신하게 된다. 시뮬레이터도 이러한 과정을 수행할 수 있도록 구성되어 있으며, 그림 8에서 볼 수 있듯이 한 소자는 다시 여러 부분으로 작게 나뉘어 펄스를 송·수신하는 역할을 수행하게 된다.

그림에서 i번째 소자에서 송신되어 산란체에서 반사되는 신호는 다음식으로 표현될 수 있다.

$$e_i(t) = \int_{t_i} \int_{t_j} p \left[t - \frac{(T_z + R_z)}{c} \right] \exp jw_0 \left[t - \frac{(T_z + R_z)}{c} \right] \times \frac{z}{T_z^{3/2}} - \frac{z}{R_z^{3/2}} dx_0 dx_0 \quad (4-2)$$

식(4-2)에서 x_0 는 반사신호의 수신시 트랜스듀서 표면에서의 적분을 구분하기 위하여 사용되었으며, R_z 는 트랜스듀서 소자 x_0 에서 산란체까지의 거리이며, 다음식으로 나타낼 수 있다.

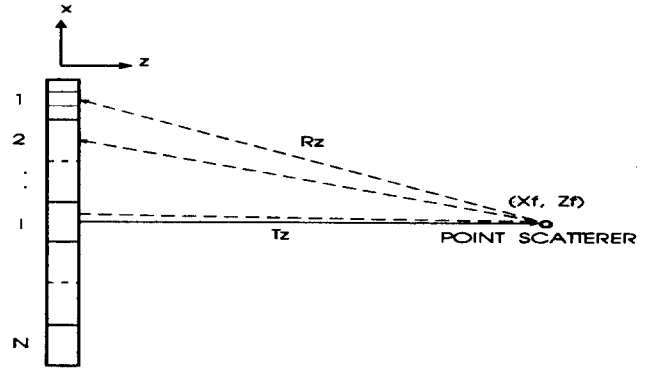


그림 8. 시뮬레이터에서의 집중 방법
Fig. 8. Focusing method in computer simulator

$$R_z = \sqrt{(x_s - x_0(i))^2 + z_f^2} \quad (4-3)$$

또한 j번째 소자들에 대한 왕복시간은 식(4-4)로 계산될 수 있다.

$$t_d(j) = (T_z + R_z(j))/C \quad (4-4)$$

따라서 집중된 신호는 위의 식(4-2)에 (4-4)를 대입하여 전체 소자들에 대하여 합산을 해주면 식 (4-5)와 같다.

$$f(x_f, y_f) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_i(t_d(j)) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_{t_i} \int_{t_j} p \left[t_d(j) - \frac{(T_z + R_z)}{c} \right] \exp jw \left[t_d(j) - \frac{(T_z + R_z)}{c} \right] \times \frac{z}{T_z^{3/2}} - \frac{z}{R_z^{3/2}} dx_0 dx_0 \quad (4-5)$$

x축, 즉 측면 방향의 포락선을 위와 같은 과정을 x축 방향으로 원하는 거리에 대해 일정한 간격으로 데이터의 갯수를 설정하여 얻을 수 있으며, 측면과 깊이 방향으로 2차원 포락선을 얻기 위해서는 깊이 방향(z축)으로도 일정한 구간에 대해 원하는 데이터의 갯수를 시뮬레이터 내에서 설정하면 된다.

3. 결과 및 고찰

윈도우들의 apodization의 효과를 분석하기 위하여 사용된 채널은 16개이고, 초점의 깊이는 50mm로 하였다. 그리고 결과는 한 점에 대하여 측면방향으로 한 선에 대한 거리와 dB단위의 진폭으로 표시한 필드패턴과 2차원 등고선의 형태로 표현한 필드패턴을 제시하였다. 먼저 그림 9는 트랜스듀서가 16채널을 사용하였을 경우 δ 값이 각각 0.002, 0.0025인 카이저 윈도우와 헤밍 윈도우 및

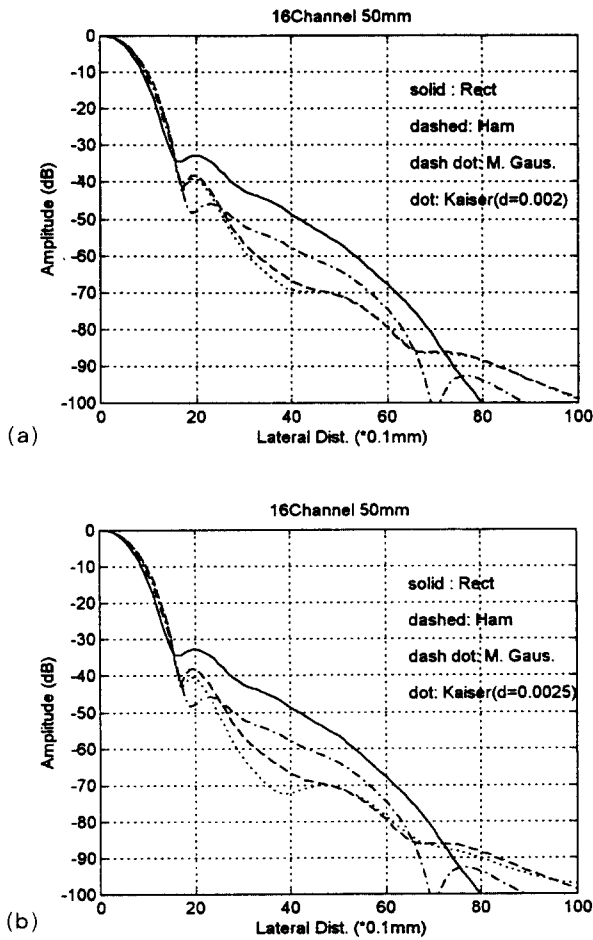


그림 9. 16채널의 경우, 거리에 따른 가중함수들의 apodization 결과

(a) δ 값이 0.002인 카이저 윈도우의 결과, (b) δ 값이 0.0025인 카이저 윈도우의 결과

Fig. 9. Apodization results of weighting functions in case of 16 channels

(a) Result of Kaiser window with $\delta=0.002$, (b) Result of Kaiser window with $\delta=0.0025$

정합 가우시안 함수들의 결과를 측면방향의 빔패턴으로 표현한 것이다.

그림 9는 초점길이 50mm에 놓여 있는 한 점에 대하여 초음파를 송·수신하는 과정을 시뮬레이션 프로그램으로 수행한 뒤, 그 점에 대한 측면방향의 필드패턴을 검출하여 표현한 것이다. 이러한 결과들은 한 점에 대한 집속을 하였기 때문에 앞에서 제시한 필드패턴의 이론에 따라 해석될 수 있다. 제시된 그림 9에서 실선은 rect함수에 의한 결과, 즉 apodization 가중 함수를 사용하지 않은 결과이며, 사선(dash)은 헤밍 윈도우를 가중함수로 사용한 결과이다. 또한 일점 쇄선(dash dot)은 정합 가우시안 함수를 가중함수로 사용한 결과이며, 점선은 카이저 윈도우를

사용한 결과이다.

그림에 나타난 필드패턴에서 해상도에 영향을 주는 것은 메인 로브의 폭과 사이드 로브의 크기 등이다. 이상적인 경우 이러한 패턴은 하나의 값을 갖게 되며, 이는 초음파 영상에서 단지 한 점으로 보이게 된다. 그러나 사용되는 영상장치의 기하학적인 한계로 인하여 아래와 같은 결과들을 보이게 되는 것이다. 따라서 분석의 내용은 메인 로브의 폭과 사이드 로브의 크기를 고려한 전반적인 범의 폭이다.

그림 9 (a)에서 살펴보면, 가중함수를 이용한 apodization을 하지 않은 경우 인접해 있는 사이드 로브의 값이 -33dB 근방까지 크게 나타나 있다. 또한 빔의 폭을 살펴보면, -60dB에서 약 5.3mm이고, -70dB에서는 6.2mm 정도를 보이고 있다. 이는 초음파 영상에서 한 점에 대한 영상이 빔의 폭만큼 퍼져서 보이게 됨을 의미한다. 그런데 헤밍 윈도우를 가중 함수로 사용하여 apodization을 수행한 결과, 인접해 있는 사이드 로브가 8dB 작아 졌으며, 이후로는 20dB정도 작게 나타남을 볼 수 있었다. 빔의 폭은 -60dB에서는 약 3.3mm 였고, -70dB에서는 4.8mm 정도로 apodization을 수행한 결과, 빔의 폭이 1-2mm정도 좁게 나타남을 볼 수 있다.

한편 정합 가우시안 함수를 사용한 결과는 메인 로브에 인접한 사이드 로브의 경우 헤밍 윈도우의 결과 값보다 8dB정도 작게 나타났지만, -45dB를 기준으로 그 이하의 부분에서는 헤밍 윈도우의 결과보다 적은 8dB에서 10dB 사이의 균일한 사이드 로브 억제 효과를 보이고 있다. 빔 폭은 -60dB에서 4.5mm, -70dB에서 5.6mm 정도로 헤밍 윈도우의 결과 값보다 1mm이상 넓게 나타나고 있다. 이에 비하여 점선으로 나타낸 δ 값이 0.002인 카이저 윈도우의 결과는 -50dB를 기준으로 볼 때, 헤밍 윈도우의 결과와 비슷하지만, -60dB 근방에서는 오히려 헤밍 윈도우의 결과보다 사이드 로브가 약 3dB 정도 더 작아졌음을 볼 수 있었다. 이로 인하여 빔폭은 -60dB에서 헤밍 윈도우의 결과보다 0.3mm정도 좁아졌다.

그림 9의 (b)에서는 δ 값이 0.0025인 카이저 윈도우를 사용한 결과를 다른 함수들과 비교하여 보여주고 있는데, 점선으로 나타낸 카이저 윈도우의 사이드 로브 억제 효과를 보면, 메인 로브에 인접한 사이드 로브의 경우 헤밍 윈도우의 결과보다 2-8dB정도 더 억제되어 나타나고 있다. 또한 -60dB에서의 빔폭이 2.8mm 정도로 헤밍 윈도우의 결과보다 0.5mm 좁게 나타남을 볼 수 있었다. 이러한 결과 값은 본 논문에서 여러 차례의 시뮬레이션을 거친 후 가장 성능이 우수하다고 판단된 것이다. 한편 사이드 로브의 크기가 작아질 수록 메인 로브의 폭은 넓어지는데, 이것은 사이드 로브의 감쇄 효과를 감안할 때 무시할 수 있을 정도의 작은 크기이다. 분석된 결과 값은 다음의

표 1. Apodization 결과의 분석
Table 1. Analysis for results of apodization

	인접 사이드 로브의 최대 크기	사이드 로브의 전반적인 감쇄 효과	-60dB에서의 빔폭	-70dB에서의 빔폭
Apodization을 하지 않은 경우	-33dB		5.3mm	6.2mm
Hamming Window의 경우	-38dB	20dB-5dB	3.3mm	4.8mm
Matched Gaussian의 경우	-46dB	13dB-8dB	4.5mm	5.6mm
δ 값이 0.002인 Kaiser Window의 경우	-39dB	23dB-6dB	3.0mm	4.8mm
δ 값이 0.0025인 Kaiser Window의 경우	-40dB	25dB-7dB	2.8mm	4.7mm

표 1에서 정리하여 나타내었다.

표 1에서 사이드 로브의 전반적인 감쇄 효과를 표현한 데이터는 그림 9에서 -80dB까지를 관찰하였을 때, apodization을 실시하지 않는 필드 패턴과 비교하여 apodization을 실시하였을 경우에 감쇄되는 사이드 로브의 크기 범위를 나타낸 것이다.

이상의 결과를 보완하기 위하여 그림 10, 11, 12, 13에서는 한 점에 대한 필드패턴을 등고선의 형태로 제시하였다. 제시된 등고선에서 측면방향은 초점을 기준으로 상하로 각각 10mm 길이에 대하여 0.1mm 간격으로 100개씩의 데이터를 검출한 것이다. 그러므로 전체적으로 20mm 길이에 대하여 200개의 데이터를 검출한 것이다. 또한 깊이 방향으로는 10mm 길이에 대하여 0.1mm의 간격으로 100개의 데이터를 검출한 것이며, 초점 깊이는 앞의 시뮬레이션에서와 동일하게 50mm이므로 데이터 검출 길이는 45mm

에서 55mm까지이다. 사용된 채널의 수는 동일하게 16개이다.

그림에서 등고선의 간격은 10dB로 하였으며, -60dB까지만 표시하였다. 일반적으로 초음파 영상장치에서는 -60dB이상을 고려하여 영상화하기 때문에 -60dB까지만 고려하게 되었다. 그림에서 사이드 로브들이 작아지게 되면, 전반적인 등고선의 폭, 즉 빔폭이 좁아져서 타원에 가까운 형태의 등고선들이 그려지게 되며, 이는 보다 향상된 영상의 질을 의미하게 된다. 이러한 결과는 한 점에 대한 패턴이기 때문에 정확히 원의 형태로 나타나야 하지만, 사이드 로브들의 영향으로 초음파 영상에서 물체의 주변이 흐려지게 되는 것이다. 다음의 그림들에서 외곽의 굵은 선이 -60dB의 등고선을 표시하는 것이며, 내부의 굵은선은 -10dB의 등고선을 표시하는 것이다.

그림 10은 apodization 가중함수를 사용하지 않고 검출

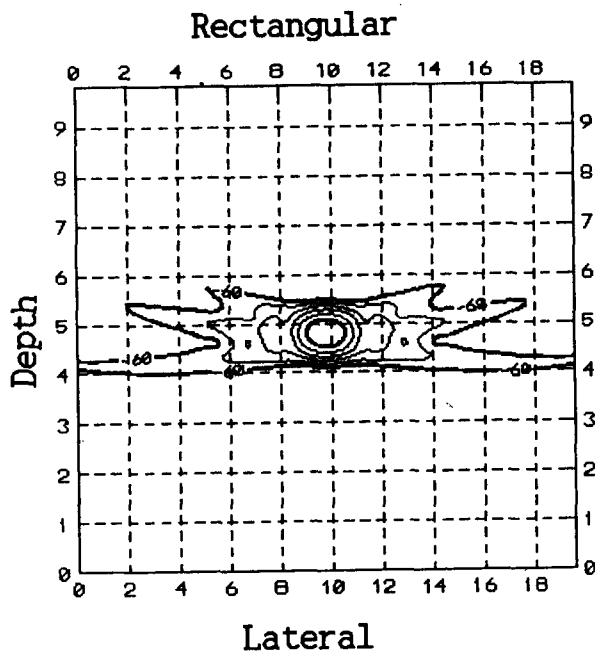


그림 10. Apodization을 하지 않은 결과
Fig. 10. Result without apodization

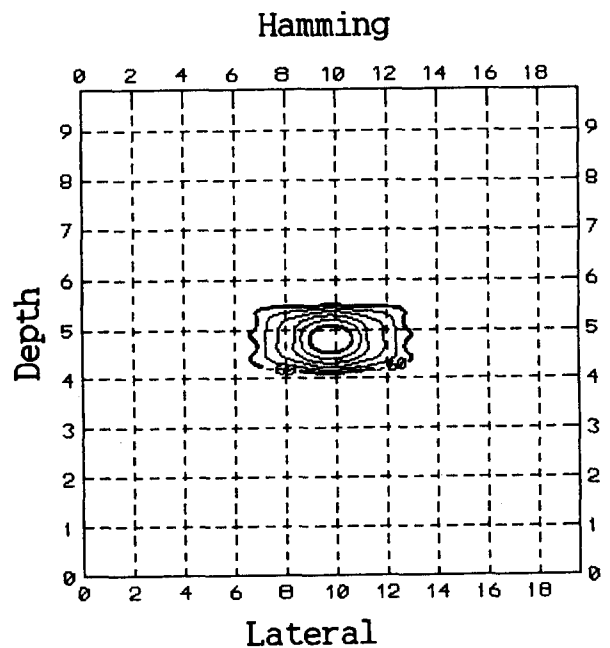


그림 11. Hamming 윈도우 결과
Fig. 11. Result of the Hamming Window

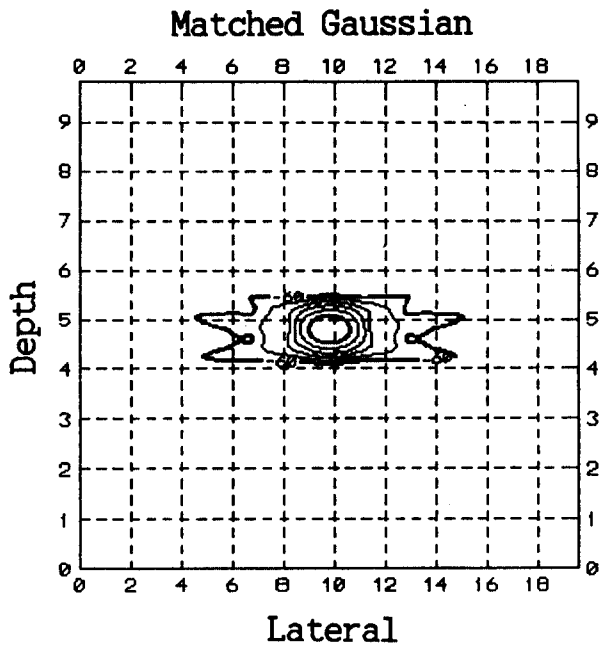


그림 12. 정합 가우시안 결과
Fig. 12. Result of the Matched Gaussian

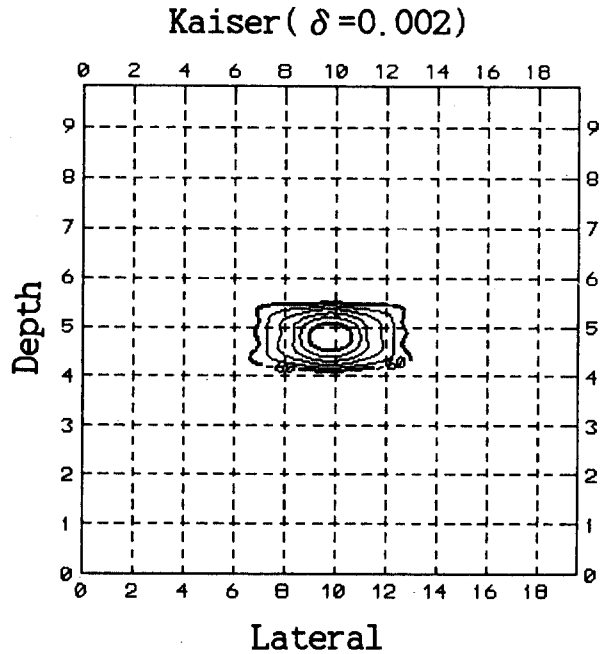


그림 13. δ 값이 0.002인 카이저 윈도우 결과
Fig. 13. Result of the Kaiser Window with δ of 0.002

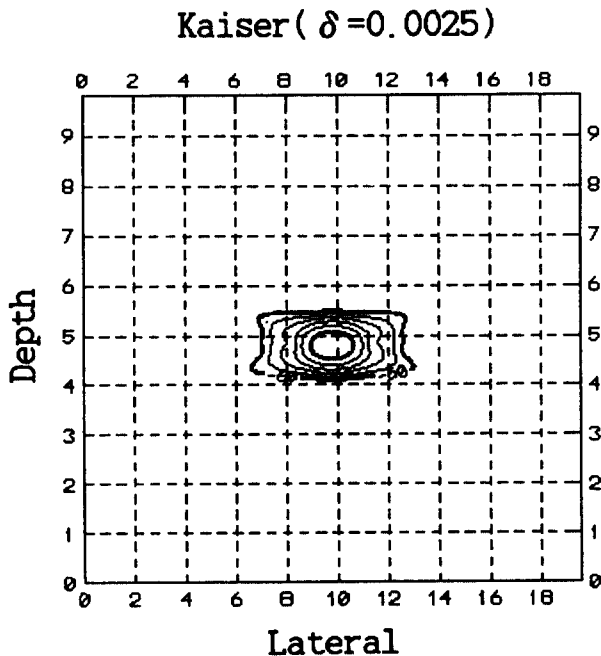


그림 14. δ 가 0.0025인 카이저 윈도우의 결과
Fig. 14. Result of a Kaiser window with δ of 0.0025

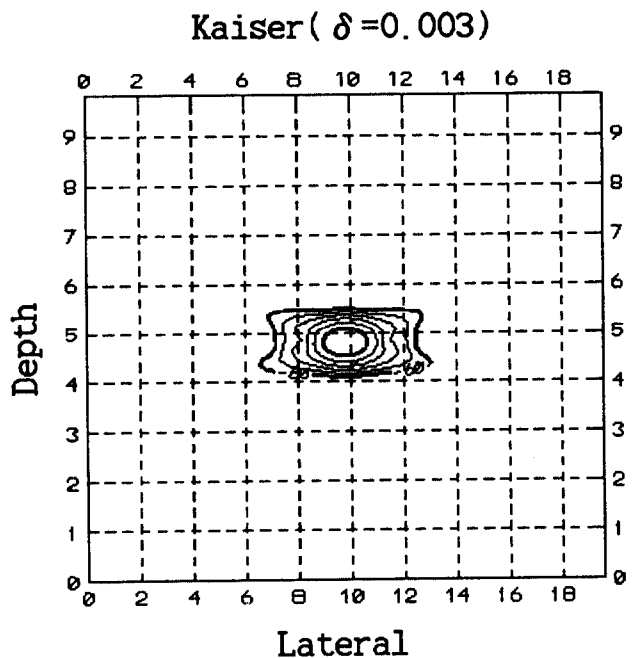


그림 15. δ 가 0.003인 카이저 윈도우의 결과
Fig. 16. Result of a Kaiser window with δ of 0.003

한 시뮬레이션 결과이다. 등고선의 형태를 보면, 측면 방향으로 -60dB 의 사이드 로브 등고선이 검출 구간 전체에 걸쳐 나타남을 볼 수가 있다. 또한 -50dB 의 등고선이 상당한 넓이에 걸쳐 확연히 나타남을 볼 수 있다. 이는 초

음파 영상에서 볼 때는 한 점으로 나타나지 못하고 점 주변에 그림자와 같은 모양들이 넓게 나타난다고 생각할 수 있다. 다만 메인 로브라고 생각할 수 있는 -30dB 이상의 등고선들만이 원에 가깝게 모양을 이루고 있다.

그림 11은 가중 함수로 헤밍 윈도우를 사용하였을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 등고선의 형태를 보면 앞의 그림 11에 비하여 주변의 사이드 로브들이 많이 사라져서 어느 정도 원의 형태를 갖추고 있음을 알 수 있다. 측면방향으로 넓게 퍼져 있었던 -60dB의 사이드 로브들이 거의 사라져서 이제는 타원의 형태로 확연히 좁아졌으며, -30dB의 등고선은 그림 11에서 보다는 조금 넓어졌음을 볼 수 있다.

그림 12는 정합 가우시안 함수를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과를 보여주고 있으며, 그림에서 보면, -60dB의 사이드 로브들이 그림 10보다는 좁게 나타나지만, 그림 11과 비교해 보면 상당히 넓게 나타남을 볼 수 있다. -45dB 이상을 고려한다면 가장 우수한 성능을 지녔다고 할 수도 있지만, 초음파 영상 시스템에서는 -60dB까지를 고려하는 것이 일반적인 경우이므로 헤밍 윈도우에 비하여 성능이 좋다고는 할 수 없겠다.

그림 13은 그림 9 (a)에서와 같이 δ 값이 0.002인 카이저 윈도우를 이용한 결과이다. -60dB의 등고선을 보면 헤밍 윈도우를 사용한 결과와 유사한 모양을 갖추고 있지만, 좀더 완만한 형태를 이루고 있음을 볼 수 있다. -50dB 이상의 등고선들은 헤밍 윈도우의 결과와 같은 모양이다. 이상의 결과들을 비교해 보면, δ 값이 0.002인 카이저 윈도우를 apodization의 가중 함수로 사용하였을 경우에 그 결과가 헤밍 윈도우의 결과와 유사한 등고선의 형태를 유지하면서도 사이드 로브의 폭이 조금은 향상된 것으로 나타났다.

그림 14는 δ 값이 0.0025인 카이저 윈도우를 가중 함수로 사용한 시뮬레이션 결과이다. 그림을 보면, -60dB의 크기를 갖는 등고선들에서 가운데 부분이 평탄하게 되었음을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 헤밍 윈도우를 사용한 결과나 δ 값이 0.002인 카이저 윈도우를 사용한 결과보다 더 우수한 것이다. 본 논문에서 여러 차례의 시뮬레이션을 해본 결과, 기존의 가중 함수보다 우수한 apodization 성능을 얻을 수 있는 카이저 윈도우의 δ 값은 0.0025였다. 이러한 결과를 보충하기 위하여 δ 값이 0.0025보다 큰 0.003의 값을 이용한 결과를 그림 15에 제시하였다. 그림 15를 살펴보면 δ 값이 0.0025인 결과와 유사한 모양으로 보이지만, 대각선 방향으로 사이드 로브들의 값이 커져서 조금 더 길게 나타남을 볼 수 있다.

이상의 시뮬레이션 결과들을 살펴보면, δ 값이 0.0025인 카이저 윈도우가 헤밍 윈도우의 결과에서 대각선 방향의 사이드 로브들의 크기는 유지하면서도 가운데 부분의 사이드 로브들의 크기를 줄여주고 있음을 알 수 있다. 또한 δ 값이 0.0025보다 커질 수록 대각선 방향의 사이드 로브들이 커져서 길게 나타났다.

결 론

초음파 영상장치에서 해상도 개선을 위하여 사용되고 있는 방법들 가운데 초음파의 펄드 패턴에서 사이드 로브를 줄일 수 있는 방법인 apodization 기술에 대하여 논의되었다. Apodization에서는 주파수 스펙트럼 상에서 사이드 로브가 작게 나타나는 윈도우 함수들이 가중 함수로 사용되고 있으며, 본 논문에서는 이러한 가중 함수들과 카이저 윈도우의 성능이 비교, 분석되었다. 카이저 윈도우는 이미 알려져 있듯이 변수 조절에 의하여 다양한 파형을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

가중 함수로써 카이저 윈도우의 성능 분석을 위하여 헤밍 윈도우와 1980년에 Andre가 제안한 정합 가우시안 함수의 시뮬레이션 결과가 제시되었다. 결과들에서 측면 방향의 빔패턴을 관찰해보면, 정합 가우시안 함수는 이미 알려진 결과와 마찬가지로 전 구간에 걸쳐 8dB에서 10dB 정도의 균일한 사이드 로브 억제 효과를 보였으며, 메인 로브에 인접해 있는 사이드 로브는 -45dB 정도로 다른 가중 함수들에 비하여 작게 나타났다. 그렇지만, 등고선 형태를 보면, 다른 가중 함수들에 비하여 -60dB의 크기를 갖는 사이드 로브들이 넓은 영역에 걸쳐 나타나고 있음을 볼 수 있었다. 결국 정합 가우시안 함수는 -45dB 이상에서만 그 성능이 우수한 것으로 알 수 있었다. 이에 비하여 헤밍 윈도우와 δ 값이 0.002, 0.0025인 카이저 윈도우의 apodization 결과는 -45dB 까지는 정합 가우시안 함수에 비하여 사이드 로브들이 크게 나타나지만, -60dB에서 -80dB까지의 사이드 로브들이 더 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 등고선 형태의 빔패턴에서도 -60dB의 사이드 로브가 정합 가우시안 함수에 비하여 전반적으로 폭이 좁아지는 효과를 보이고 있다.

시뮬레이션 결과 가장 성능이 우수하다고 판단된 δ 값이 0.0025인 카이저 윈도우의 결과를 살펴보면, 그림 9 (b)에서 헤밍 윈도우의 결과보다 더 우수하게 나타났으며, 등고선 형태의 결과인 그림 14에서도 헤밍 윈도우의 결과에서 보였던 측면 방향으로 가운데의 불룩한 부분이 사라졌음을 볼 수 있었다. 한편 δ 값이 0.0025보다 크면 대각선 방향으로 사이드 로브들의 크기가 증가하여 더 길게 나타게 된다.

위와 같이 여러 차례 시뮬레이션을 해본 결과 카이저 윈도우의 주파수 응답에서 피크 근사화 오차를 의미하는 δ 값을 조절하여 가장 성능이 우수한 카이저 윈도우의 패턴을 구할 수 있었다. 그 값은 0.0025였으며, 표 I 과 빔패턴을 등고선의 모양으로 제시한 결과에서 그 성능이 증명되었다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. A. Macovski, *Medical Imaging System*. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1983.
2. A. J. Duerinckx, "Matched Gaussian Apodization of Pulsed Acoustic Phased Arrays", *Ultrasonic Imaging*, vol. 2, pp. 338-369, 1980.
3. J. F. Havlice, J. C. Taenzer, "Medical Ultrasonic Imaging: An Overview of Principles and Instrumentation", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 4, Apr. 1979, pp. 620-640.
4. A. Macovski, "Ultrasonic Imaging Using Arrays", *Pro. of the IEEE*, Vol. 67, No. 4, April 1979, pp. 484-495.
5. M. G. Maginness, "Methods and Terminology for Diagnostic Ultrasound Imaging Systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, No. 4, April 1979, pp. 641-653.
6. D. R. DIETZ, "Apodized Conical Focusing for Ultrasound Imaging", *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, Vol. SU-29, No. 3, May 1982, pp. 128-138.
7. W. L. Beaver, D. H. Dameron, A. Macovski, "Ultrasonic Imaging with an Acoustic Lens", *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, Vol. SU-24, No. 4, July 1977, pp. 235-243.
8. B. G. Bardsley and D. A. Christensen, "Beam patterns from pulsed ultrasonic transducers using linear systems theory", *J. Acoust. Son Am.* 69(1), Jan 1981, pp. 25-30
9. C. B. Burckharat, "Method for Increasing the lateral Resolution of B-scan", in *Acoustical Holography and Imaging*, Vol. 5, P. S. Green editor (Plenum Press, New York, London 1973), pp. 391-413.
10. B. S. Lee, and S. B. Park, "Modeling and Computer simulation of ultrasound imaging systems and human tissues", *Ultrasonic Imaging* 10, pp. 229-247, (1988)