

공간주파수응답의 기저대역 확장에 의한 초음파영상의 개선

The Enhancement of the Acoustic Image by Combining Bases of Support for SFR (Spatial Frequency Response)

송 대 건*, 오 동 인**, 김 현***, 전 계 석****
(Dae Geon Song*, Tong-In Oh**, Hyun Kim***, Kye-Suk Jun****)

*경원전문대학 전자정보과, **경희대학교 한방시스템공학과, ***부천대학 컴퓨터제어과, ****경희대학교 전자공학과
(접수일자: 2002년 11월 7일; 수정일자: 2003년 6월 10일; 채택일자: 2003년 6월 13일)

항공전자산업이나 반도체 산업분야에서 제품에 대한 품질관리와 안정성 확보 및 생산공정의 경비절감이라는 차원에서 초음파현미경이 사용되고 있다. 기존의 초음파현미경은 음향렌즈의 단일 특성주파수에서만 영상을 획득함으로써 깊이방향의 영상분해능이 결정되어졌다. 본 연구에서는 음향렌즈의 대역폭 내에서 동작주파수를 변화시키면서 k_z 방향성분의 지연을 일으켜 k_z 방향의 대역폭을 증가시키므로 깊이 분해능이 향상됨을 보였다. 실험에서는 내부의 홀을 갖는 시료와 깊은 홀을 갖는 시료에 대해 다중 주파수 (4.4 MHz ~ 5.6 MHz)를 적용한 결과, 영상강도의 변화가 단일 주파수인 경우 10% 이내로 변화하였으나 다중 주파수의 경우 50%로 나타났다. 한편 결함의 깊이가 다른 고체 내부의 결함에 대한 초음파 영상의 복원시, 진폭의 경우에는 단일 주파수를 사용한 경우 결함의 형태는 나타났으나 깊이 정보는 알 수 없었고 다중 주파수를 사용한 경우 깊이에 따라 다른 영상 강도를 나타내며 출력되었다. 따라서 초음파 현미경에서 다중주파수를 사용할 경우, 깊이방향으로 더 좋은 영상분해능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

핵심용어: 포인트 스프레드 함수, 영상분해능, 깊이 분해능, 영상강도

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.3)

In this paper, we have studied the enhancement of the acoustic image by combining bases of support for SFR (Spatial Frequency Response) taken at multi-frequencies. The scanning acoustic microscope system have been constructed using the quadrature detector that is able to measure the amplitude and phase of the reflected signal simultaneously. Both real and quadrature components of reflected signal have been acquired at 4.4 MHz to 5.6 MHz reliably and accurately. In this experimental result, better depth resolution can be obtained by numerically combining images taken at several different frequencies. Image intensity have been better about 3.4 times at multi-frequency than one at a single frequency.

Keywords: Point spread function, Image resolution, Depth resolution, Image intensity

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.3)

I. 서론

첨단과학의 급속한 발달과 더불어서 반도체, 전자부품, 정밀소자 및 신소재 개발과 같은 산업이 급속히 성장하고 있으며, 각 기업들은 제품생산의 품질관리와 고신

뢰도를 통한 생산성 향상에 적극 노력하고 있다. 따라서 각 관련 산업분야에서는 생산제품의 고신뢰도와 안전성을 확보하기 위하여 비파괴검사 (NDE: Non-Destructive evaluation) 장비와 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다.

초음파현미경 (SAM: Scanning Acoustic Microscope)은 기존의 광학현미경으로는 검출이 어려운 불투명한 피사체의 내부를 가시화 (可視化) 할 수 있다는 장점을 갖고 있기 때문에 현재 반도체 산업분야에서 활발히 사용되고 있다[1,2].

책임저자: 송대건 (dgsong@kwc.ac.kr)
461-702 경기도 성남시 수정구 복정동 산 65번지
경원전문대학 전자정보과
(전화: 031-750-8753; 팩스: 031-750-8758)

이러한 초음파영상의 분해능은 초음파 빔의 직경 또는 빔의 PSF (Point Spread Function)과 영상을 구성하는 픽셀들의 크기와 간격, 그리고 결합에서 반사된 신호의 3/N비 등 초음파현미경의 기계적인 요소에 의해 결정된다[3]. 만약 신호원의 변화만으로 영상의 분해능이 개선된다면 하드웨어의 교체없이 저렴한 비용으로 영상의 질을 크게 개선할 수 있을 것이다.

기존의 초음파현미경은 단일 동작주파수를 사용하여 초음파영상을 복원한다. 이 때 동작주파수가 일정하다면 음향렌즈에 의해 결정되는 깊이방향 공간주파수대역이 제한을 받게 된다[4]. 이러한 대역은 일반적으로 협대역의 특성을 지니며 높은 주파수에서 동작시킬 경우, 결합의 깊이 방향 변화를 미세히 관찰할 수는 있으나 침투 깊이가 작아진다는 단점을 갖게 한다.

본 연구에서는 초음파현미경의 동작주파수를 초음파 변환기가 가지는 대역폭 내에서 변화시켜 가면서 획득한 각각의 영상 데이터를 합성함으로써 깊이 방향으로 공간주파수 대역폭을 증가시켜 시료표면과 시료 내부의 영상을 개선시키는 방법에 대해 연구한다. 이러한 영상처리를 위해서는 신호에 대한 진폭과 위상정보가 필요하다. 그러나 기존의 수신검출장치로 사용되던 포락선 검출기는 반사신호의 진폭에 비례하는 전압만을 출력하고 위상 정보는 무시되었기 때문에 위상정보 획득을 위해 반사신호에 대한 진폭과 위상을 동시에 획득할 수 있는 쿼드러춰 검출기를 사용하여 초음파현미경 시스템을 구성하였다.

II. 공간주파수응답 대역 확장에 의한 초음파영상 개선

2.1. 3차원 공간주파수응답

영상화하려는 결합이 시료의 표면 밑에 있는 경우, 수신된 영상은 식 (1)과 같이 여러 평면 영상들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$g(\vec{r}; z) = \int h(\vec{r}; z; z') \cdot f(\vec{r}; z') dz' \quad (1)$$

여기서 z 는 시료표면으로부터 초음파변환기의 수직위치 좌표이고, z' 은 시료 내 결합의 수직위치좌표이며, \vec{r} 는 $\vec{r} = x\vec{x} + y\vec{y}$ 로 표현되는 x, y 2차원 평면상의 거리 벡터이다. g 는 측정된 초음파영상, f 는 피사체의 초음파 영상특성, h 는 z 평면에 있는 시료 내 결합에 대한 초음파 변환기의 2차원 PSF이다. 물과 같이 일정한 매질 내에

담겨진 물체에 대해서 2차원 PSF은 z 방향으로 공간에 대해 변함이 없다. 따라서 PSF은 식 (2)와 같이 오직 초음파 변환기의 z 좌표와 영상화되어지는 결합 사이의 상대적인 거리 차이에 의존한다.

$$h(\vec{r}; z; z') = h(\vec{r}; z - z') \quad (2)$$

2차원 PSF들은 하나의 3차원 공간벡터에 의해 3차원 PSF으로 대체될 수 있으며 3차원 공간 좌표에 대한 컨벌루션을 적용하면 식 (3)과 같다[5].

$$g(\vec{R}) = h(\vec{R}) * f(\vec{R}) \quad (3)$$

송수신 반사형 초음파변환기의 PSF인 $h(\vec{R})$ 는 3차원 송신PSF ($s_{10}(\vec{R})$)과 수신PSF ($s_{01}(\vec{R})$)의 곱으로 식 (4)와 같다[6].

$$h(\vec{R}) = s_{10}(\vec{R})s_{01}(\vec{R}) \quad (4)$$

영상 스펙트럼의 개념으로부터 3차원 공간주파수영역에서 식 (4)는 식 (5)와 같이 전송계수에 대한 스펙트럼 ($S_{10}(\vec{k})$)과 반사계수에 대한 공간주파수 스펙트럼 ($S_{01}(\vec{k})$)의 컨벌루션으로 변형된다.

$$H(\vec{k}) = S_{10}(\vec{k}) * S_{01}(\vec{k}) \quad (5)$$

x, y 방향에 대한 파수 \vec{k}_x, \vec{k}_y 와 비초점거리 z 항에 의해 단 방향으로 전송되는 공간주파수 스펙트럼 ($S_{10}(\vec{k})$)은 식 (6)과 같이 원점에서의 공간주파수응답과 z 축으로의 공간주파수를 지수로 갖는 지수함수 곱의 형태로 표현된다.

$$S_{10}(\vec{k}_x, \vec{k}_y; z) = S_{10}(\vec{k}_x, \vec{k}_y; 0) e^{ik_z z} \quad (6)$$

여기서 \vec{k}_x, \vec{k}_y 는 x, y 방향의 파수이다. 식 (6)의 지수부분은 k_z 영역에서 델타함수로 변형되며 따라서 스펙트럼은 식 (7)과 같이 된다.

$$S_{10}(\vec{k}) = S_{10}(k_x, k_y) \delta(k_z - \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}) \quad (7)$$

여기서 \vec{k} 는 각주파수 ω 에서 초음파의 파수이다. 식 (7)에서 \vec{k} 가 어떠한 값을 가지든지 상관없이 델타함수는 단일주파수에서 평면파를 구성하는 k_x 와 k_y 에 의해 k_z 가 결정된다는 사실을 나타낸다. 따라서 스펙트럼 중 0이 아닌 기저대역 (base of support)은 식 (8)에 의해 주어지는 구의 표면부분이다[7].

$$\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{\omega}{c} \tag{8}$$

깊이방향 (z)과 2차원 평면방향 (x,y)에서 기저대역의 범위는 초음파변환기의 수용각 (acceptance angle), θ_a 에 의해 결정되어지며 여기서 최대 축방향 (x,y) 공간주파수, $k_{x,y,max}$ 에 의해 식 (9)와 같이 주어진다[8].

$$\sin(\theta_a) = \frac{k_{x,y,max}}{k} \tag{9}$$

반사형 초음파현미경에서는 하나의 초음파변환기를 가지고 송수신을 함께 사용하므로 수신하는 공간주파수 응답 (SFR), S_{01} 은 송신하는 공간주파수 응답 (SFR)과 같은 기저대역을 가진다. 그림 1에서 보여지는 바와 같이 두개의 공간스펙트럼을 컨벌루션하면 기저대역은 단방향 응답의 폭과 높이의 두 배가 된다. 그러므로 양방향 기저대역 (two-way base of support)은 식 (10)과 같이 반지름이 두 배인 구에 의해 경계를 이룬다.

$$\sqrt{k_x'^2 + k_y'^2 + k_z'^2} = 2 \frac{\omega}{c} \tag{10}$$

2.2. 공간주파수 응답 대역 확장에 의한 깊이 분해능의 개선

초음파 영상에서 분해능의 개선정도는 공간주파수영역에서 보다 쉽게 가시화시킬 수 있다. 획득 가능한 최대 깊이 분해능은 초음파영상의 공간주파수 응답 (SFR)에 의해 채워지는 공간주파수영역의 범위에 의해서 결정된다 [9]. 이 영역을 SFR의 기저대역 (Base of support)이라고 부르며 이 영역밖에 존재하는 물체의 스펙트럼은 초음파현미경에 의해 검출이 불가능하다. 이러한 공간주파수영역의 범위는 획득 가능한 분해능을 제한한다. 반사형

초음파현미경에서 초음파변환기의 형태가 원형이면서 대칭인 경우, 초음파영상의 분해능과 관련된 공간주파수와 동작주파수 사이에는 식 (10)과 같은 관계가 있다.

깊이 방향, 즉 z축에 대한 공간주파수에 대해서 횡방향 벡터성분을 x, y성분으로 분리하여 정리하면 식 (11)과 같이 표현된다.

$$k_z = \sqrt{(k^2 - (k_x^2 + k_y^2))} \tag{11}$$

식 (11)에서 보면 동작주파수 f의 변화에 의해 공간주파수 k가 변화하게 되고, 이 변화는 깊이방향 분해능을 결정짓는 k_z 성분의 변화를 유도한다. 이때 횡방향 분해능은 식 (12)와 같다.

$$k_{x,y} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \tag{12}$$

초음파현미경에서 영상분해능을 결정짓는 공간주파수 응답 (SFR: spatial frequency response)의 기저대역은 그림 2와 같다. 그림 2는 3개의 다른 동작주파수에서 동일한 초음파변환기를 동작시켰을 때 각각의 동작주파수에 대한 공간주파수 응답을 표시하고 있다. 공간주파수 k_1, k_2, k_3 에 대해 횡방향은 a_1, a_2, a_3 의 대역폭을 가지며, 깊이 방향의 대역폭은 각각 b_1, b_2, b_3 를 갖는다. SFR의 상측 경계는 2.1의 식 (10)에서 설명한 것과 같고, 하측 경계는 초음파변환기의 f-number에 의해서 결정된다. 만일 초음파변환기가 다른 동작주파수에서 사용된다면 k_z 방향으로 기저대역이 천이될 것이다. 이러한 공간스펙트럼들을 합성하면 단일주파수에서 동작시키는 것에 비하여 기저대역이 확장될 것이다.

특히 그림 3에서의 결과를 통하여 보면, 상대적으로 높은 주파수에서는 동작주파수 변화에 의한 빔폭의 변화가 작으므로 빔폭에 의해 결정되는 횡방향 분해능은 거의

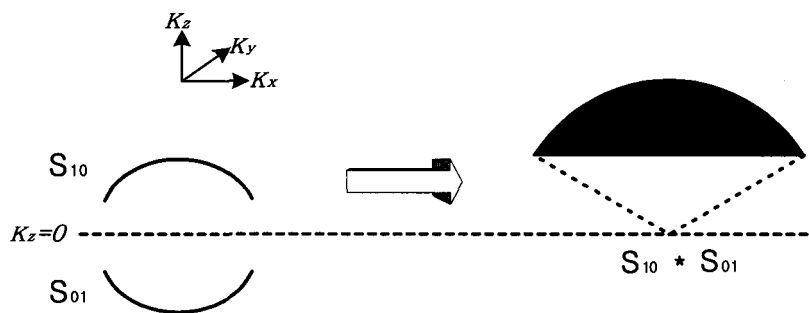


그림 1. 송신과 수신 공간스펙트럼의 컨벌루션
Fig. 1. Convolution of transmitting and receiving spatial frequency.

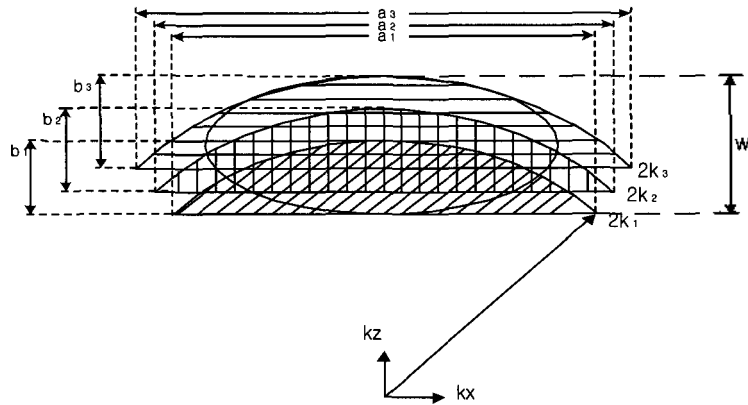


그림 2. 3개의 다른 주파수를 중첩할 때 초음파현미경의 공간주파수응답의 기저대역
 Fig. 2. Bases of support for the microscope's spatial frequency response operating at three different frequencies superimposed.

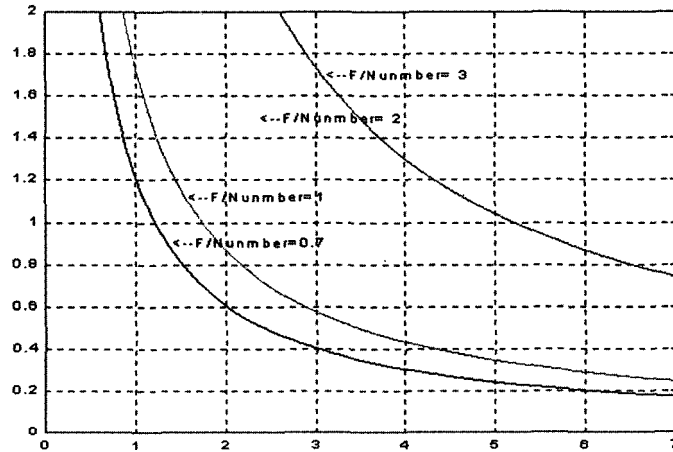


그림 3. 음향렌즈와 동작주파수의 변화에 따르는 빔폭의 변화
 Fig. 3. Beam width in accordance with variation of acoustic len and operating frequency.

차이를 나타내지 않는다. 그러나 z방향인 깊이 방향에 대해서는 식 (11)의 관계에 의해 상대적으로 기저대역폭이 크게 향상되어 W로 확대됨을 그림 2를 통해 알 수 있다. k_x 에 대한 공간주파수 대역폭의 증가는 초음파변환기의 대역폭과 부착된 음향렌즈의 최대 개구면에 의해 결정되기 때문에 증가시킬 수 있는 최대 범위도 초음파변환기의 특성에 의해서 제한을 받는다[10].

영상을 조합하는 방법은 초음파현미경의 동작주파수를 초음파변환기의 대역폭 내에서 변화시켜 얻어진 영상 스펙트럼을 조합하여 얻을 수 있으며 i 번째 단일 주파수를 사용하여 얻어진 영상스펙트럼은 식 (13)과 같다.

$$G(\omega_i; \vec{k}) = H(\omega_i; \vec{k})F(\vec{k}) \quad (13)$$

초음파현미경에 의해 측정된 영상의 공간스펙트럼 $G(\omega_i; \vec{k})$ 은 피사체의 영상특성 $F(\vec{k})$ 과 초음파현미경의 공간주파수 응답 $H(\omega_i; \vec{k})$ 의 곱의 형태로 나

타낼 수 있다. 즉, 주파수 ω_i 가 변할 때마다 초음파현미경의 공간주파수 응답이 변화하게 되고 따라서 측정되어지는 영상의 공간스펙트럼 또한 변화된다. 식 (13)을 동작주파수를 변화시키면서 획득한 영상들에 대한 행렬방정식의 형태로 표현하면 다음 식 (14)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} G(\omega_1; \vec{k}) \\ \vdots \\ G(\omega_N; \vec{k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\omega_1; \vec{k}) \\ \vdots \\ H(\omega_N; \vec{k}) \end{bmatrix} [F(\vec{k})] \quad (14)$$

식 (14)를 행렬 표기법으로 표기하면 식 (15)와 같다.

$$\mathbf{G}_{\vec{k}} = \mathbf{H}_{\vec{k}} \mathbf{F}_{\vec{k}} \quad (15)$$

식 (15)에 최소자승법을 사용하여 피사체의 영상특성인 $F(\vec{k})$ 에 대해서 정리하면 식 (16)과 같이 되어 피사체의 영상을 얻을 수 있다.

$$F_{\vec{k}} = \frac{H_{\vec{k}}^u G_{\vec{k}}}{H_{\vec{k}}^u H_{\vec{k}}} \quad (16)$$

$F_{\vec{k}}$ 결과는 다른 주파수에서 얻어지는 모든 영상들로부터 계산되어짐으로써 물체 스펙트럼에 대한 최소자승근사가 된다. 쿼드러춰 검출기를 이용하여 각 주파수에서 획득한 동영상 (in-phase) 성분과 쿼드러춰 (quadrature) 성분을 가지고 진폭과 위상을 계산하여, 이를 공간주파수 영역에서 합성한다. 합성된 결과는 확장된 공간주파수 응답과 식 (16)에 대입하여 피사체 영상의 스펙트럼을 얻고 그 결과를 역푸리에 변환한 후, 필터링하여 영상을 복원한다.

변화시키는 주파수 사이의 간격은 한 공간주파수 응답 (SFR)의 상측 경계와 다른 공간주파수 응답 (SFR)의 하측 경계가 서로 충분히 겹쳐지도록 해야 한다. k_z 방향으로의 이동은 주파수 변화에 비례하며 식 (17)과 같다[11].

$$\Delta k = 2 \frac{\Delta \omega}{c} \quad (17)$$

여기서 $\Delta \omega$ 는 식 (18)과 같이 변형된다.

$$\Delta \omega = \frac{c \Delta k}{2} \quad (18)$$

실제 동작주파수의 간격은 기저대역이 겹쳐지기 위해서 계산된 양보다 더 적어야만 한다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 주파수 변화에 따른 초음파편미경의 $V(z)$ 곡선에 대한 모의실험

깊이 방향의 분해능 개선은 여러 동작주파수에서 계산한 이상적인 $V(z)$ 곡선을 이용하면 공간영역에서 쉽게 비교, 분석할 수 있다. 초음파변환기가 시료 위의 x,y 평면상의 일정한 한 점에 위치할 때, 초음파변환기와 시료 사이의 거리를 변화시키면서 얻은 초음파변환기의 출력 전압을 $V(z)$ 곡선이라 하며, 시료와 초음파변환기 사이의 거리 변화의 함수이다. 이러한 $V(z)$ 곡선은 초음파변환기의 영상특성이나 매질의 영상특성을 결정하는데 사용된다. $V(z)$ 곡선이 유한 범위를 갖는 함수인 SFR에 따르면 이웃하는 두 곡선의 기저대역이 주파수영역에서 지연될 때 겹치지 않는다고 가정하면 $V(z)$ 곡선은 그림 4, 5, 6에서와 같이 sinc함수의 형태를 갖는다. 각각의 그림은 초음파편미경의 동작주파수를 다르게 하였을 때, 초음파편미경의 전압 출력곡선인 $V(z)$ 의 변화와 합성된 $V(z)$ 곡선을 모의 실험한 결과이다. 그림 4는 동작주파수가 5 MHz일 때, 그림 5는 동작주파수가 5.5 MHz일 때 $V(z)$ 곡선의 변화를 나타낸다. 식 (19)와 같이 그림 4와 그림 5의 $V(z)$ 곡선을 대수적으로 합하면 합성된 $V(z)$ 곡선을 그림 6과 같이 얻을 수 있다.

$$V_{sum}(z) = V_{\omega_1}(z) + V_{\omega_2}(z) \quad (19)$$

그림 4, 5와 6을 비교할 때, 그림 6은 그림 4, 5와 같이 sinc형태의 $V(z)$ 곡선을 얻을 수 있으며, z변화에 대하여 기울기가 더 급격함을 볼 수 있다. 유효한 $V(z)$ 곡선의 침투치의 예리한 정도에 의해 반사물의 위치를 정확히 가늠

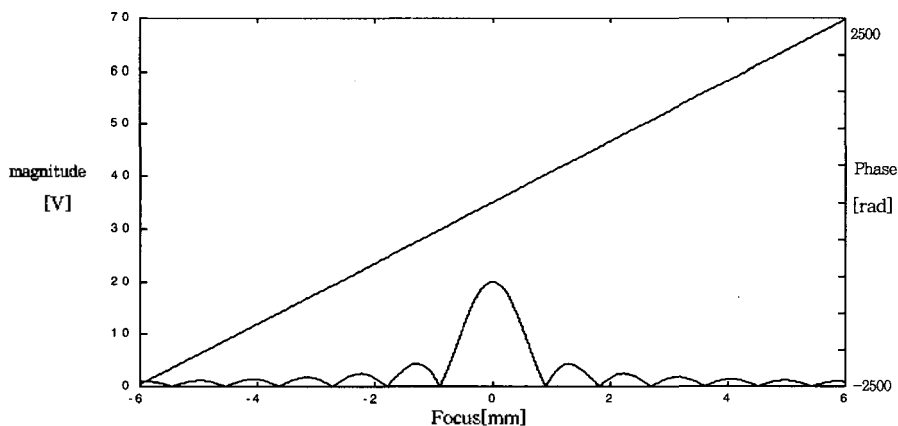


그림 4. 동작주파수 5 MHz에서의 $V(z)$ 곡선
Fig. 4. $V(z)$ curve for 5 MHz operating frequency.

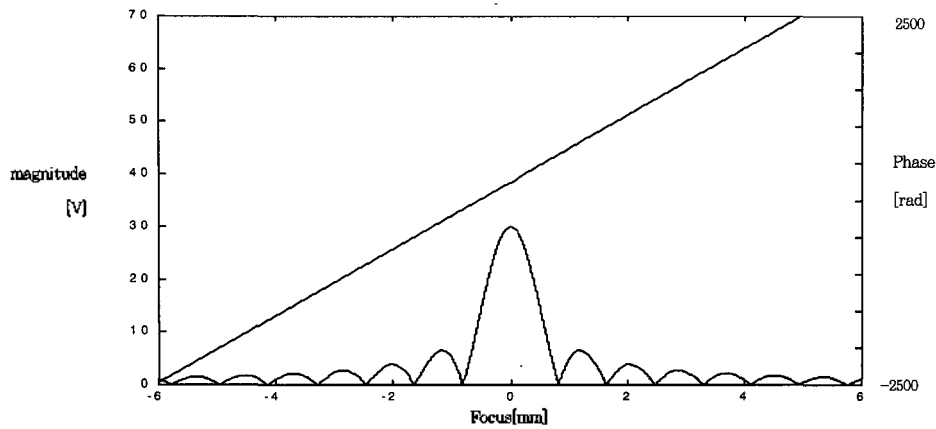


그림 5. 동작주파수 5.5 MHz에서의 V(z)곡선
Fig. 5. V(z) curve for 5.5 MHz operating frequency.

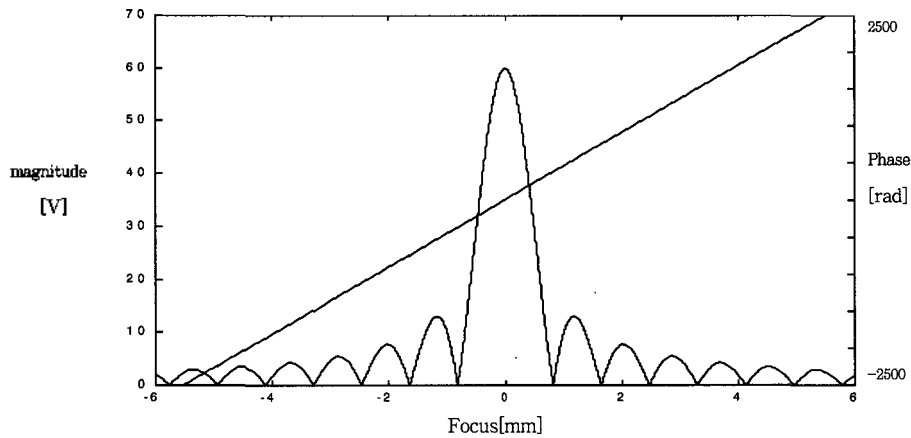


그림 6. 다중 동작주파수에서 합성된 V(z)곡선
Fig. 6. V(z) curve for multi-operating frequency.

할 수 있는 정도가 결정되기 때문에 다중 주파수를 이용할 경우 시료의 깊이 방향에 대해 그림 6과 같이 보다 민감한 진폭 영상을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

그리고 A/D변환을 위한 양극성 피크홀드회로로 구성된다. 그림 8과 같이 디지털 위상 지연기를 통해 위상변화가

3.2. 초음파현미경 시스템 구성

개선된 초음파영상을 얻기 위해서는 초음파현미경의 동작주파수를 가변시키면서 획득한 영상들에 대한 진폭과 위상정보가 필요하다. 그림 7은 진폭과 위상정보를 동시에 획득할 수 있도록 구성된 쿼드러춰 초음파현미경 시스템의 블록선도를 보이고 있다. 이때 초음파변환기는 중심주파수가 5 MHz이고 비대역폭이 35%인 초음파변환기를 사용하였다. 초음파변환기의 주파수 대역폭은 4.125 MHz에서 5.875 MHz이고, 비대역폭 0.35를 고려하여, 동작주파수를 4 MHz에서 6 MHz 내로 변화시키면서 5개의 톤버스트파를 만들어 사용하였다.

시료에서 반사된 음향파의 진폭과 위상 성분을 검출하기 위한 쿼드러춰 검출기는 믹서, 저역통과필터, 증폭기,

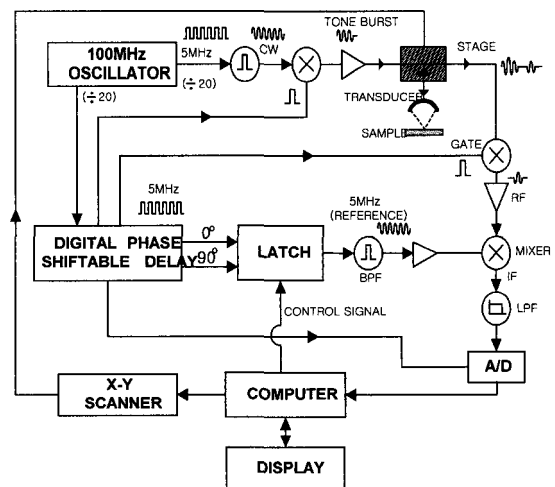


그림 7. 쿼드러춰 검출기를 이용한 초음파현미경의 블록선도
Fig. 7. The block diagram of an acoustic microscope using quadrature detector.

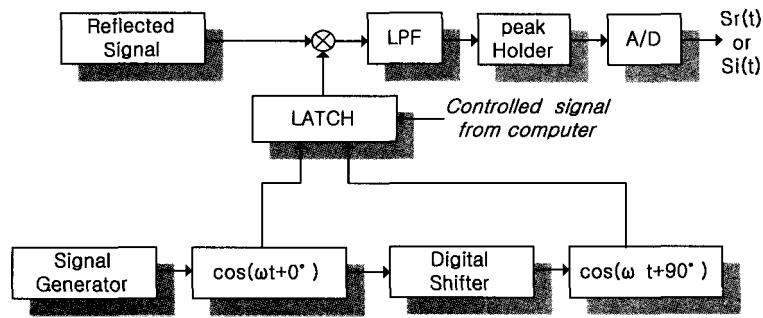


그림 8. 쿼드러춰 검출기의 블록선도
Fig. 8. The block diagram of a quadrature detector.

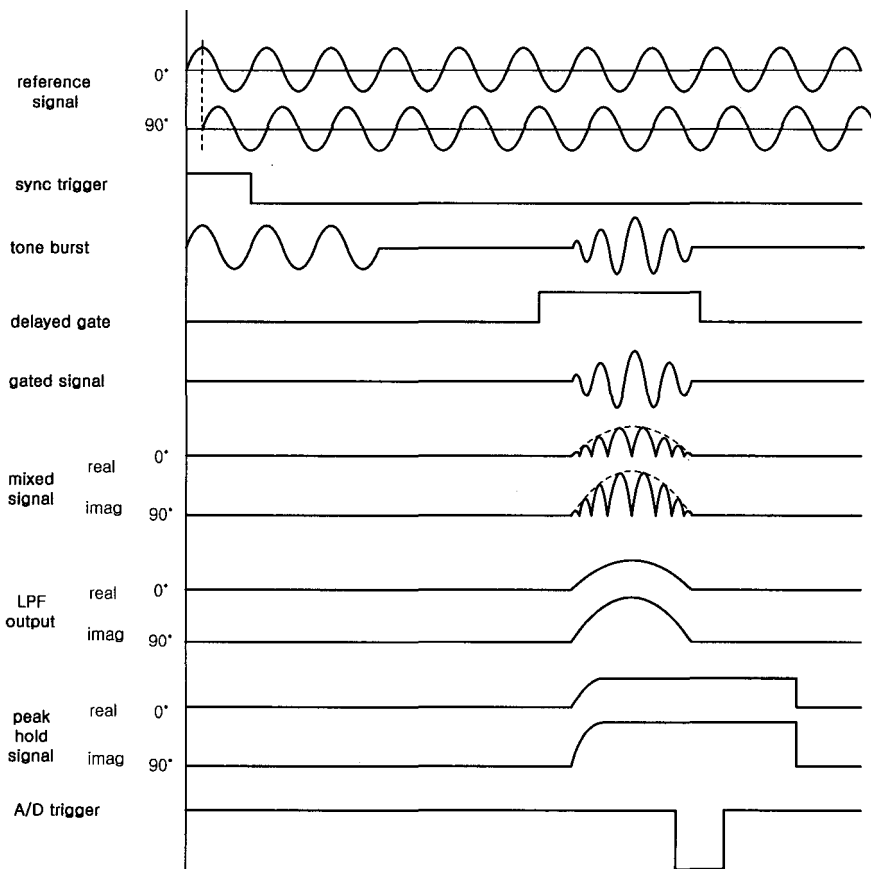


그림 9. 쿼드러춰 검출기를 이용한 초음파현미경의 타이밍선도
Fig. 9. Timing diagram of an acoustic microscope using quadrature detector.

가능한 기준신호는 반사신호와 믹싱된 후 저역통과필터를 통과한다. 필터 후단에는 양자화를 위해 양극성 피크 홀드회로를 부가한다. 본 시스템은 다중 채널로 인한 에러를 줄이기 위해 그림 8과 같이 단일채널을 갖는 쿼드러춰 검출기를 제작하여 동일한 공간적 위치에서 순차적으로 실수부와 허수부를 얻을 수 있도록 그림 7과 같이 제작하였다[12].

그림 9는 쿼드러춰 검출기를 사용한 초음파현미경의 각 구성단에서 전체적인 타이밍을 나타낸다.

개선된 깊이 분해능을 시험하기 위해 직접회로 캐패시터 (integrated circuit capacitor)의 스케일 모델로 설계된 시편을 제작하여 실험하였다. 알루미늄을 사용하여 제작된 시편은 그림 10과 같이 깊이가 100 μm 이고 폭이 2 mm인 결함 (trench)을 가지고 있다.

그림 11(a)는 5 MHz의 단일 동작주파수를 사용하여 그림 10의 직접회로 캐패시터의 스케일모델을 라인 스캔한 영상이고, 그림 11(b)는 동작주파수를 4 MHz에서 6 MHz까지 100 kHz 간격으로 변화시켜 가면서 동일한 시료를 라인 스

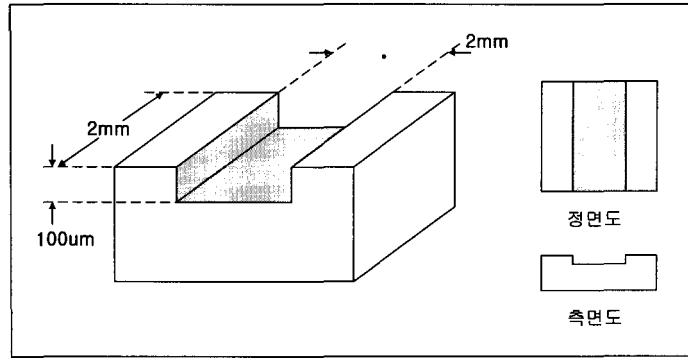
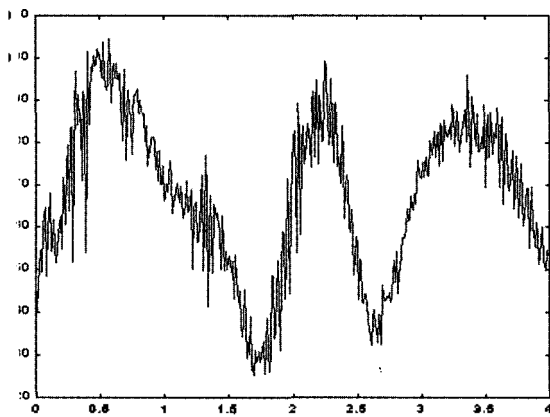
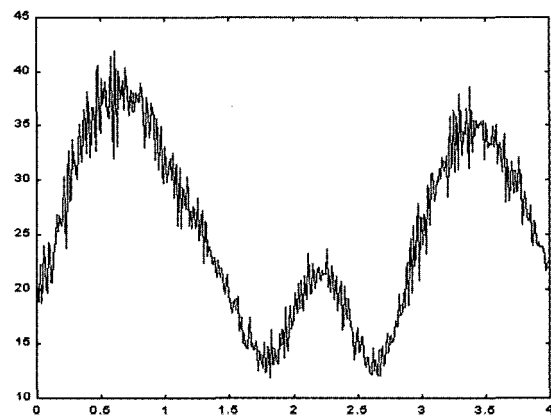


그림 10. 집적회로 캐패시터의 스케일모델
 Fig. 10. The scale model of integrated circuit capacitor.



(a) 동작주파수: 5 MHz



(b) 동작주파수: 4 MHz ~ 6 MHz

그림 11. 라인스캔곡선
 Fig. 11. Line-scan curve.

채하여 획득한 영상 데이터를 합성한 영상이다.

단일 주파수만을 사용하여 얻은 라인 스캔곡선은 결함의 경계 부분에서만 산란으로 인해 큰 영상강도를 나타내고 있을 뿐 실제결함이 존재하는 부분에서의 영상강도차는 상대적으로 작게 나타나고 있다. 그림 11(a)에서 보던 결함이 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분의 영상강도차가 0.077로 나타났다. 그러나 다중주파수를 이용하여 개선한 라인 스캔곡선은 그림 11(b)에서와 같이 결함의 경계 부분뿐 아니라 결함이 실제로 존재하는 영역 전체에 걸쳐 존재하지 않는 영역과 0.290의 큰 영상강도 차이를 보이고 있다. 또한 최소사승법을 사용함으로써 잡음레벨도 작아져 영상이 크게 개선됨을 볼 수 있다.

그림 12와 같이 표면에서 결함까지의 깊이가 다르게 의치하도록 하여 4개의 원형결함을 제작한 시료에 대해서 내부결함에 대한 초음파영상을 복원하였다. 그림 12에서 결함 a는 표면으로부터 깊이가 -1.5 mm이고, b는 -2 mm, c는 -2.5 mm, d는 -3 mm이다. 따라서 높이가 다른 내부결함에 대해 높이에 따라 다른 영상강도가 측정된다면

이를 통해 내부 결함에 대한 깊이 방향 분해능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

그림 13(a)와 그림 13(b)는 개선 전과 개선 후의 영상으로 이미지 필드는 5 mm × 5 mm로 하였으며 픽셀간의 간격은 50 µm로 하였다. 디포커싱 깊이는 초점 (z=0)에 대하여 -3 mm시켜 얻었다.

그림 13(a)는 단일주파수를 사용하여 얻어진 고체 내부 영상이다. 결함의 깊이가 다름에도 불구하고 거의 유사한 영상강도를 나타내고 있으며 결함의 형태는 나타나고 있으나 깊이는 알 수 없었다. 그림 13(b)는 동작주파수를 4.4 MHz에서 5.6 MHz까지 200 kHz씩 가변시키면서 획득한 영상 데이터들을 합성하여 얻어진 영상이다. 그림 13(b)에서 보면 결함이 존재하고 있는 깊이에 따라서 영상강도가 다르게 나타나고 있으며 결함이 존재하는 면이 각각 다를 수 있었다. 또한 결함이 존재하는 면의 영상강도의 차이가 단일 동작주파수인 경우에 비하여 다중주파수를 사용한 경우 3.4배 크게 나타나 결함에 대한 분해능이 훨씬 향상되었음을 확인할 수 있었다.

그림 13(b)에서 보는 바와 같이 동작주파수 변화에 의하여 얻어진 영상들을 합성하여 복원한 영상에서는 깊이 방향에 대한 분해능이 향상되어 나타났으며, 고체 내부의 결함이 존재하는 층이 다른 경우에 있어서 영상의 질을 향상시키는 것은 물론 결함이 존재하는 면에 대한 예측이 가능하였다.

IV. 결론

기존의 초음파현미경에서는 단일 동작주파수를 사용하여 초음파영상을 획득하여 왔다. 따라서 단일 동작주파수를 사용하여 획득한 영상의 깊이 방향 분해능은 오직 초음파변환기의 음향렌즈에 의해 결정되어졌다. 본 연구에서는 공간주파수 영역에서 다중주파수를 사용하여 획득한 영상들을 합성하여 기저대역을 확장시킴으로써 깊이 방향 분해능이 향상된 초음파영상을 얻는 방법에 대해 연구하였다. 초음파현미경에서 동작주파수를 변화시키면 깊이 방향으로 기저대역의 천이가 일어나게 되므로 현미경의 동작주파수를 변화시키면서 획득한 영상들을 합성할 경우 기저대역이 단일 동작주파수만을 사용하여 얻어지는 영역보다 확장되게 된다. 이러한 영상개선 방법은 반사신호의 진폭과 위상정보가 필요하므로 기존의 포락선검출기가 아닌 쿼드러춰 검출기를 사용하였다.

실험에서는 중심주파수가 5 MHz이고, 비대역폭이 35%인 초음파변환기를 사용하여 쿼드러춰 검출기를 이용한 반사형 초음파현미경 시스템을 구성하였다. 결함 (Trench)을 갖는 집적회로 캐패시터의 스케일모델에 대한 실험 결과, 단일 동작주파수를 사용하여 획득한 영상에서는 결함이 존재하는 영역과 그렇지 않은 영역 사이의 영상강도 차이가 0.077로 작게 나타난 반면, 4 MHz~6 MHz에서 100 kHz 간격으로 동작주파수를 변화시키면서 획득한 데이터를 합성하여 복원한 영상에서는 영상강도의 차이가 0.290으로 단일주파수를 사용한 것에 비해 약 3.77배가 향상되어 나타났다.

또한 깊이가 다르게 제작된 4개의 내부 원형결함에 대해 실험한 결과, 단일주파수를 사용한 경우 복원된 영상에서 결함의 형태는 나타났으나 영상강도의 차를 가지고 결함이 존재하는 깊이는 알 수 없었다. 반면에 동작주파수를 4.4~5.6까지 200 간격으로 가변시키면서 획득한 영상데이터들을 합성하여 복원한 영상에서는 단일주파수만을 사용한 영상과는 달리 실제 결함의 깊이 차에 따

라 영상강도의 차이가 다르게 나타났다. 또한 결함이 존재하는 면의 영상강도의 차이가 단일 동작주파수인 경우에 비하여 다중주파수를 사용한 경우 3.4배 크게 나타나 결함에 대한 분해능이 훨씬 향상되었음을 확인할 수 있었다.

앞으로의 연구과제는 동작주파수 가변시 변화되는 주파수의 범위와 개수가 영상의 질 (quality)에 미치는 관계를 연구하고 처리시간을 보다 빠르게 할 수 있는 알고리즘의 개발하는 연구가 이루어져야 하겠다. 또한 결함의 형태뿐만 아니라 깊이 방향성 등을 정량적으로 평가할 수 있는 3차원 영상개선기법과 입체적인 결함영상을 복원하는 연구가 계속 이루어져야겠다.

참고 문헌

1. D. O. Thompson, and D. E. Chimenti, Eds., *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 6A*, New York, Plenum Press, 1987.
2. R. C. McMaster, *Nondestructive Testing Handbook II*, New York, Ronald, 1959.
3. G. S. Kino, *Acoustic Waves*, Prentice-Hall, 1987.
4. J. D. Fraser, "The design of efficient broadband ultrasonic transducers," G. L. Report (2973), Stanford University May 1979.
5. A. V. Oppenheim, *Signal and System*, Prentice-Hall, 1983.
6. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, 1996.
7. A. Briggs, *Acoustic Microscopy*, Oxford, 1992.
8. M. Spencer, *Fundamentals of Light Microscopy*, Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
9. A. Atalar, *Acoustic Reflection Microscope*, Ph. D. dissertation, Stanford Univ., 1978.
10. 문 건, "음향현미경의 특성해석과 고체표면 및 내부영상 검출," 경희대학교 박사학위논문, 1988.
11. L. W. Kessler and D. E. Yuhas, "Acoustic microscopy-1979," *Proc. IEEE*, 67 (4), 526-536, 1979.
12. 고대식, "Small aperture형 초음파현미경 시스템의 구성 및 성능해석," 경희대학교 박사학위논문, 1991.

저자 약력

• 송 대 건 (Dae Geon Song)



1982년 2월: 경희대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1988년 3월: 일본 외세대학교 대학원 정보공학과 졸업 (공학석사)
 1998년 2월: 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
 현재: 경원전문대학 전자정보과 교수
 * 주관심분야: 광 음향 신호처리 및 영상처리, 트모 그래픽 영상시스템

● 오 동 인 (Tong-In Oh)



1999년 2월: 경희대학교 전자,전파계열 공학사
2002년 2월: 경희대학교 전자공학과 공학석사
2002년 3월~ 현재: 경희대학교 한방시스템공학과 박사과정
※ 주관심분야: 초음파현미경, 신호처리, EIT (electrical impedance tomography)

● 김 현 (Hyun Kim)



1990년 2월 경희대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
1992년 2월: 경희대학교 일반대학원 전자공학과 석사졸업 (공학석사)
1999년 8월: 경희대학교 일반대학원 전자공학과 박사졸업 (공학박사)
현재: 부천대학 컴퓨터제어과 조교수

● 전 계 석 (Kye-Suk Jun)

한국음향학회지 제18권 제3호 참조