

# 축 방향 공간주파수 대역의 확장을 통한 고체 내부영상 개선

구길모\*, 김상백\*, 김 현\*\*, 전계석\*\*\*

## The Enhancement of Inner-solid Image by the Bandwidth Increment of Vertically Spatial Frequency

Kil-mo Koo\*, Sang-baik Kim\*, Hyun Kim\*\*, Kye-suk Jun\*\*\*

**Key Words:** Inner-solid Image(고체 내부영상), Bandwidth Increment(대역 확장), Vertically Spatial Frequency(축 방향 공간주파수)

### Abstract

In this paper, we have studies the images have been reconstructed by using combination of images which has been acquired by the variation of operating frequency. When inner images has been reconstructed, inner image has been superposition by surface state effect. In this case, image enhancement the phase object and enhance the contrast of inner image. In the result of the specimen for the round defect with 2mm diameter, for the types of the depth are 1.5mm, 2mm, 2.5mm, and 3mm, it has been show that the shape of defect has better than before this processing and phase contrast grow large twice. And we have constructed the acoustic microscope by using quadrature detector that is able simultaneously to acquired the amplitude and phase of the reflected signal. Father more we have studied the reconstruction method of the amplitude and phase images and the enhancement method of the defect images' contrast.

### 기호설명

$C_1, C_2, C_3$  ; 렌즈, 액체, 검사체 매질의 속도  
 $A$  ; 개구면의 지름  
 $D$  ; 초음파 변환기에서 시료까지 거리  
 $F$  ; 음향렌즈의 초점거리  
 $h$  ; 초음파 현미경의 PSF  
 $\theta_v$  ; 입사각  
 $\theta$  ; 굴절각  
 $R$  ; 곡률반경

PSF ; Point Spread Fuction  
 $Kn$  ;  $n$  의 파수  
 $W_s$  ; 대역폭최소  
 $W_m$  ; 대역폭최대  
 $|K|$  ; 공간 주파수  
 $|K_r|$  ; 횡 주파수  
 $K_z$  ; 깊이 방향분해능  
 $\omega_i$  ; 인덱스  
 $G(\omega_i; \vec{k})$  ; 영상스펙트럼  
 $H_k^u$  ; 역 행렬  
 $F_{\vec{k}}$  ; 다른 주파수 획득 영상

\*한국원자력연구소 열수력안전연구팀

\*\*부천대학 컴퓨터제어학과

\*\*\*경희대학교 전자공학과

## 1. 서론

급속한 첨단산업의 발달과 더불어서 반도체, 전자부품, 정밀소자 및 신소재 개발과 같은 산업이 급속히 성장하고 있으며 각 기업들은 생산제품의 품질관리와 고신뢰도를 통한 생산성 향상에 적극 노력하고 있다. 따라서 각 관련 산업분야에서는 생산 제품의 고신뢰도와 안전성을 확보하기 위하여 비파괴 검사 장비와 기술에 대한 필요성이 증가하고 있다. 초음파현미경(SAM: Scanning Acoustic Microscope)은 기존의 광학현미경으로는 검출이 어려운 불투명한 고체의 시료 내부를 가시화(可視化) 할 수 있다는 장점을 갖고 있으며 특히 국내 반도체 산업 분야에서는 초음파현미경 시스템이 생산성 향상에 크게 기여하고 있다.<sup>1,2)</sup>

이러한 초음파현미경은 일반적으로 단일 주파수를 사용하여 초음파 영상을 복원한다. 이때 동작주파수가 일정하다면 음향렌즈에 결정되는 축방향 공간주파수 대역이 제한되며 이러한 대역은 일반적으로 협대역의 특성을 나타내고 있기 때문에 결함의 깊이 방향의 변화가 미세한 경우 고주파수의 초음파변환기를 사용하였다. 그러나 이러한 고주파수의 초음파변환기를 사용한다면 침투 깊이가 작아진다는 단점이 있었다.<sup>3)</sup> 본 연구에서는 초음파변환기의 대역폭 내에서 입력되는 전기신호의 주파수를 변화시키면서 획득한 영상을 합성하여 깊이 방향의 분해능이 향상된 고체 내부 영상을 합성하는 방법에 대해서 연구한다. 이러한 영상 개선에서는 획득한 영상들의 진폭과 위상 데이터가 필요하기 때문에 실험에서는 검출기로써 쿼드러춰 검출기를 사용하여 초음파현미경을 구성하였고, 이때 초음파변환기는 비대역폭이 35%이고 중심주파수가 5MHz인 변환기를 사용한다. 시편으로는 알루미늄을 선택하고, 시편 내부에 시료 표면으로부터 깊이가 다른 4개의 원형결함을 제작하여 실험한다.

## 2. 축 방향 공간주파수 대역 확장을 통한 고체 내부 영상의 개선

일반적으로 초음파현미경의 분해능은 초음파변환기의 성능에 의하여 결정된다. 따라서 초음파현미경에서 획득한 영상 데이터는 초음파현미경에서 사용된 초음파에 의해서 영상의 질이 결

정되고, 특히 음향렌즈와 동작주파수에 의하여 결정된다. 일반적으로 초음파 영상을 얻기 위해서는 초음파변환기의 중심주파수를 동작주파수로 사용하여 고체 내부의 영상을 획득하기 위해서는 그림 1에서와 같이 디포커싱 모드 스캔을 위한 음향렌즈의 기하학적인 형상이다.

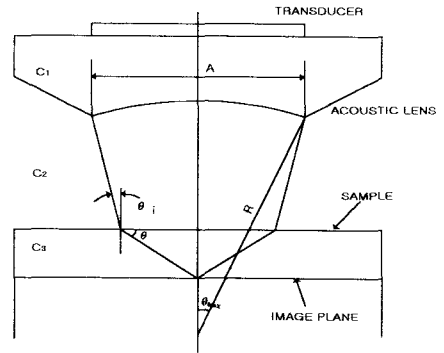


Fig 1. Geometrical structure of acoustic lens for defocusing mode

초음파변환기에서 여기된 초음파는 그림 1에서 보여진 바와 같이 음향렌즈에 의해서 집속이 되며, 이때 집속된 초음파 빔은 유한한 크기의 빔 폭을 가지게 되며 횡 방향 분해능을 결정하게 된다. 피사체에 초음파변환기가 디포커싱 되었을 때 얻어지는 PSF는 이러한 초음파의 빔 폭에 의하여 결정되며 따라서 초음파변환기의 최대 개구면의 각도가 커진다면 이에 따라서 빔 폭이 다르게 나타난다. 개구면의 각도와 동작주파수 변화에 대한 빔 폭의 변화는 저주파수인 경우는 음향렌즈의 형태 변화에 보다는 동작주파수의 변화에 대해서 빔 폭의 변화가 민감한 반면 고주파수의 경우는 동작주파수보다는 음향렌즈의 형태 변화에 대해서 빔 폭의 변화가 크게 나타난다.<sup>4,5)</sup>

이와 같은 횡 방향 분해능은 최대 개구면의 크기와 각도에 의해서 결정되며 또한 깊이 방향 분해능과 관계된다. 이러한 관계는 공간주파수 영역에서 살펴보면 보다 쉽게 설명 될 수 있다. 고체 내부에 집속된 면에서 획득한 PSF를 2차원 푸리에 변화하면 SFR를 구할 수 있다. 이러한 SFR은 대역이 존재하게 되게 측정된 영상은 이러한 SFR에 의해서 대역 제한을 받게 된다.

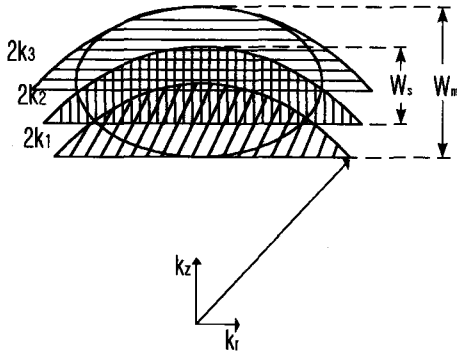


Fig. 2. Bases of support for the microscope's spatial frequency response at 3 different frequencies superimposed

초음파변환기가 원통이면서 대칭인 경우, 반사형 초음파현미경에서 초음파변환기는 송수신으로 사용되고 있기 때문에 그림 2에서 보여지는 바와 같은 모양의 대역을 갖는다. 이때 공간주파수는 식(1)과 같다

$$|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad (1)$$

이때 횡 방향에 대한 횡 주파수는 식(2)와 같이 정의된다.

$$|k_r| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (2)$$

횡 방향에 대한 분해능이 결정되면 식(3)에 (1) 식과 (2)을 대입하면 깊이 방향의 분해능이 결정된다.

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2} \quad (3)$$

만일 초음파현미경에서 초음파변환기의 대역폭 범위 내에서 동작주파수를 변화시킨다면 초점 거리와 빔 폭이 변화하게 되며 식(1)에 의해서 공간주파수의 지지대역도 변화하게 되어  $k_r$ 과  $k_z$ 도 이에 따라서 변화하게 된다. 그림 2은 세 개의 다른 주파수를 동작시켜 중첩시킨 경우 지지 대역을 보여주고 있다. 그림 2에서 보면 초음파현미경에서의 동작주파수를 변화시킬 때 횡 방향에 대한 대역폭의 변화는 거의 유사한 대역폭을 갖

는 반면에  $k_z$ 에 대한 변화는 다르게 나타남을 볼 수 있다. 이는 초음파변환기를 고주파에서 동작시킬수록  $k_r$ 가 음향렌즈에 의해서 결정되기 때문이다. 따라서 동작주파수를 변화시키면 식(1)과 (3)의 관계식에서  $k_z$ 방향의 지지대역에서 천이 일어나게 될 것이다.

그림 2에서 보면 초음파현미경에서 동작주파수를 단일주파수를 사용한 경우  $k_z$ 에 대한 대역폭이 최대  $W_s$ 로 한정되어 있음을 볼 수 있다. 그러나 초음파현미경에서 동작주파수를 변화시킬 경우 그림 2에서와 같이  $k_z$ 에 대해서 지연이 일어난다. 이때 획득된 각각의 공간주파수를 조합하면 영상을 구성한다면 합성된 영상은  $k_z$ 영역에서 대역폭이 최대  $W_s$ 로 증가되어 깊이 분해능이 향상된다. 이러한  $k_z$ 에 대한 공간주파수의 대역폭의 증가는 초음파변환기의 대역폭과 부착된 음향렌즈의 최대 개구면에 의해서 결정되기 때문에 증가시킬 수 있는 최대 범위도 이에 따라서 초음파변환기의 특성에 의해서 제한을 받는다.

영상을 조합하는 방법은 초음파현미경에서 초음파변환기의 대역폭 내에서 동작주파수를 변화시켜 얻어진 영상 스펙트럼을 조합하여 얻을 수 있으며  $i$ 번째 단일 주파수를 사용하여 얻어진 영상 스펙트럼은 식(4)과 같다.

$$G(\omega_i; \vec{k}) = H(\omega_i; \vec{k})F(\vec{k}) \quad (4)$$

각각의 공간주파수  $k$ 에 대해서 식(4)는 측정된 영상들과 피사체에 대한 공간 스펙트럼의 관련 행렬형태의 식으로 나타낼 수 있으며 식(5)과 같으며 여기서 인덱스는  $\omega_i$ 이다.

$$\begin{bmatrix} G(\omega_1; \vec{k}) \\ \vdots \\ G(\omega_N; \vec{k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\omega_1; \vec{k}) \\ \vdots \\ H(\omega_N; \vec{k}) \end{bmatrix} [F(\vec{k})] \quad (5)$$

식(5)은 첨자가 표시된 식으로 표기 할 수 있으며 식(6)과 같다.

$$\mathbf{G}_{\vec{k}} = \mathbf{H}_{\vec{k}} \mathbf{F}_{\vec{k}} \quad (6)$$

식(6)를 최소자승법을 사용하여 풀면 식(6)이

얻어진다.  $F_{\vec{k}}$ 는 다른 주파수를 사용하여 획득한 모든 영상으로부터 피사체에 가장 근사한 결과를 얻을 수 있다.

$$F_{\vec{k}} = \frac{H_{\vec{k}}^u G_{\vec{k}}}{H_{\vec{k}}^u H_{\vec{k}}} \quad (7)$$

여기서  $H_{\vec{k}}^u$ 는 행렬에 대한 역행렬을 의미한다

### 3. 실험 및 고찰

본 논문에서 합성을 통하여 개선된 영상을 얻기 위해서는 초음파현미경에서 동작주파수를 가변 시키면서 획득한 영상들의 진폭과 위상 데이터가 필요하다. 따라서 실험에서는 검출기로서 쿼드러춰 검출기를 사용하여 초음파현미경을 구성하였고, 이때 초음파변환기는 비대역폭이 35%이고 중심주파수가 5MHz인 변환기를 사용하였다. 그림 3은 구성된 초음파현미경의 블록도이다.

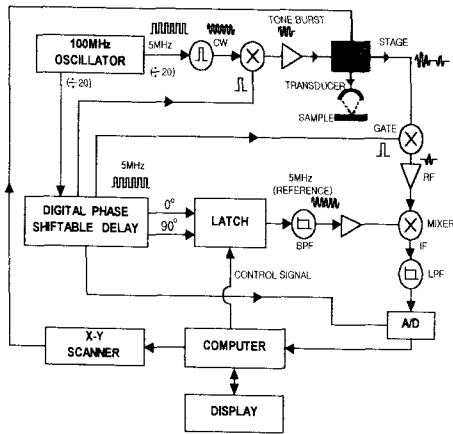


Fig. 3 Block diagram of acoustic microscope using quadrature detector

시편으로는 알루미늄을 선택하여 표면에서 결함까지의 깊이가 다르게 위치하도록 하여 4개의 원형결함을 제작하였다. 그림 4는 시료의 결함 제작을 위한 그림이다.

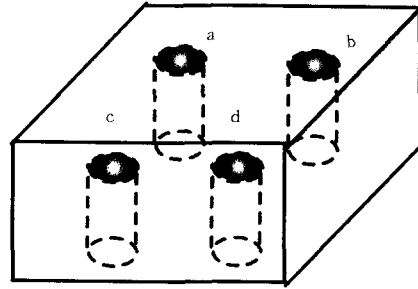


Fig. 4 Schematic diagram of sample

그림 4에서 결함 a는 표면에서 깊이가 -1.5mm, b는 -2mm, c는 -2.5mm, d는 -3mm가 되도록 제작하였다. 그림 5와 6은 개선 전과 개선 후의 영상으로 이미지 필드는 5mm×5mm로 하였으며 픽셀간의 간격은 50μm로 하였다. 한편 디포커싱 깊이는 초점(z=0)에 대하여 -3mm시켜 얻었다. 그림 5는 단일주파수를 사용하여 얻어진 고체 내부영상이다. 결함의 깊이가 다름에도 불구하고 거의 유사한 영상 강도를 나타내고 있으며 결함의 형태는 나타나고 있으나 깊이는 알 수 없었다.

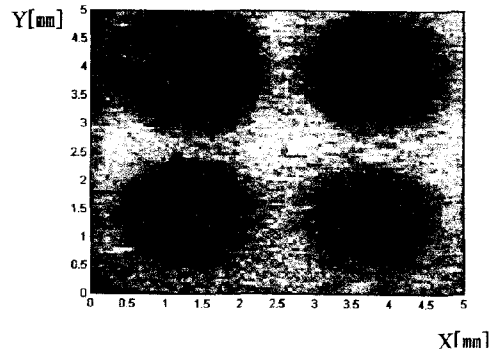


Fig. 5 Reconstruction of inner image by operating with single frequency

그림 6은 동작주파수를 4.4MHz에서 5.6MHz까지 200kHz씩 가변 시키면서 획득한 영상 데이터들을 합성하여 얻어진 영상이다. 그림 6에서 보면 결함의 존재하고 있는 깊이에 따라서 영상 강도의

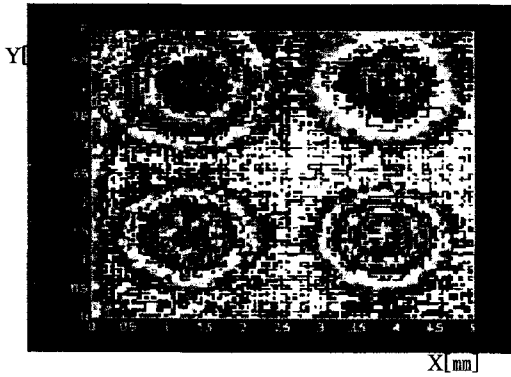


Fig. 6 The reconstruction of inner image by operating with multi-frequency

변화가 다르게 나타나고 있으며 결함이 존재하는 면이 각각 다름을 알 수 있다.

주파수에 변화에 의하여 얻어진 영상들을 합성하여 복원된 영상은 깊이 방향에 대한 분해능이 향상되어 나타나어 고체 내부의 결함이 존재하는 층이 다른 경우에 있어서 영상의 질을 향상시키는 물론 결함이 존재하는 면에 대한 예측이 가능하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 공간주파수 영역에서 축 방향 대역을 합성을 통하여 확장시켜 개선된 영상을 얻는 방법에 대해서 연구하였다. 초음파현미경에서 동작주파수를 변화시키면 축 방향에 대해서 지지대역이 천이가 일어나게 되며, 동작주파수를 변화시키면서 획득한 영상들을 합성하게 되면 지지대역이 단일 주파수를 사용한 경우에 비하여 확장된다. 이러한 영상개선 방법은 진폭과 위상 데이터가 필요하기 때문에 검출기로서 쿼드러춰 검출기를 사용하여 초음파현미경을 구성하여 실험하였다. 실험결과 5MHz의 단일 주파수를 사용하는 경우 복원된 영상에서 결함의 형태는 나타났으나 영상강도 변화를 통하여 결함의 깊이를 알 수 없었다. 반면에 동작주파수를 4.4MHz에서 5.6MHz까지 200kHz씩 가변 시키면서 획득한 영상 데이터들을 합성하여 얻어진 영상에서는 단일 주파수를 사용한 영상과는 달리 결함의 깊이에 따라서 영

상 강도가 다르게 나타났다. 따라서 동작주파수를 변화시키면서 획득한 영상들의 합성하는 경우 축 방향 분해능이 향상되었음을 알 수 있었다. 앞으로의 연구과제는 영상개선이 동작주파수의 변화를 세밀히 할수록 좋아질 것은 예측되나 영상 데이터 획득 및 영상처리를 위한 시간이 증가되므로 영상의 질과 관련되어 최적의 주파수 가변치와 획득데이터의 수에 대한 연구가 계속되어져야겠다.

#### 후기

본 논문은 과학기술부의 원자력 연구개발과제의 일환으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

1. A. Briggs, 1992, "Acoustic Microscopy", Oxford.
2. 고대식, 1991, "Small aperture형 초음파현미경 시스템의 구성 및 성능해석", 경희대학교 박사학위논문.
3. G.S.Kino, "Acoustic Waves: Devices, imaginag and analog signal processing", PRENTIC-HALL
4. P.Reinholdtsen,, 1986, "Remove the effects of surface in acoustic microscopy", IEEE. Ultrasonic Symposium, pp.756~763
5. Auld, B. A., 1973, "Acoustic fields and waves in solids", NY: Wiley.
6. Philip Denbigh, "System analysis & signal Processing", Addison-Wesley
7. Jac S. Lim, 1990, "Two-dimension Signal and image processing", Prentice-Hall.
8. J. Krautkramer, 1990, " Ultrasonic Testing of Materials ", Springer-Verlag Press.
9. Digital Signal Acquisition & Processing for NDE & Plant Maintenance Workshop, Jul 31-Aug 3, 1990, Sponsored by EPRI & Hosted by the EPRI NDE Center.