

공간주파수대역에서 기저대역 확장을 통한 원전 대비시험편과 대비 보정 시험편의 초음파 영상 개선

박치승[†] · 김선진
한양대학교 재료공학과

Ultrasonic Images Enhancement of the SS Reference Specimen and the Reference Calibration Block for NPPs by the Combining Bases of Support for Spatial Frequency

Chi-Seung Park[†] and Seon-Jin Kim
Division of Material Science and Engineering, Hanyang University

(2003년 9월 1일 받음, 2003년 9월 30일 최종수정본 받음)

Abstract Ultrasonic microscope has been used to detect the defects on surface or inner solid. Conventionally, it has used at a single operating frequency. The resolution and quality of the measured images are determined by a characteristic of the transducer of the ultrasonic microscope. The conventional ultrasonic microscope has been used envelope detector to detect the amplitude of reflected signal, but the changes in amplitude is not sensitive enough for specimen with microstructure that in phase. In this paper, we have studied multi-frequency depth resolution enhancement with ultrasonic reflection microscope for the reflectors of a stainless steel reference specimen and a reference calibration block to be used as the material in nuclear power plants for ISI, PSI. Increased depth resolution can be obtained by taking two, three-dimensional images at more than one frequency and numerically combining the results. As results of the experiment, we could get enhanced images with the rate of contrast in proportion and high quality signal distribution for the image to the changing rate of depth for the reflectors of the two kinds of specimens.

Key words Scanning Ultrasonic Microscope, Multi-Frequency, Depth Resolution, Transducer, Spatial Frequency, Bases of Support, Enhanced Image, SS: Stainless Steel, ISI: In-Service Inspection, PSI: Pre-service Inspection.

1. 서 론

초음파현미경은 기존의 광학현미경으로는 검출이 어려운 불투명한 피사체의 내부를 가시화할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 초음파영상에서 영상의 분해능은 초음파 빔의 직경에 의한 Point spread function(PSF), 영상을 구성하는 픽셀들의 크기와 간격, 결함에서 반사되는 반사 신호의 신호 대 잡음 비 또는 콘트라스트의 세 가지 요소에 의해 제한된다. 이상과 같이 초음파현미경은 기계적인 요소에 의해 영상의 분해능이 제약을 받게 된다. 만약 신호원의 변화만으로 분해능이 개선된다면 하드웨어의 교체 없이 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.^{1,4)} 이러한 단일 주파수를 사용하여 얻

어진 영상의 공간주파수 대역은 일반적으로 협대역의 특성을 지니며, 높은 주파수에서 동작시킬 경우, 횡방향의 분해능은 향상되나, 초음파의 침투 깊이가 상대적으로 작아지므로 인하여 결함의 깊이 방향 변화를 미세히 관찰할 수 없다는 단점을 갖는다.⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 깊이 방향으로 공간주파수 대역폭을 증가시켜 시료표면과 시료 내부의 영상을 개선시키는 방법에 대해 연구하였다. 이러한 방법은 초음파현미경의 동작주파수를 초음파변환기가 가지는 대역폭 내에서 변화시켜 가면서 획득한 각각의 영상 데이터를 합성시킴으로써 가능하다. 이러한 영상처리를 위해서는 신호에 대한 진폭과 위상정보가 필요하다. 기존의 수신검출장치로 사용되던 포락선 검출기는 반사신호의 진폭에 비례하는 전압만을 출력하고 위상정보는 무시되었다. 따라서 본 연구에서는 위상정보 획득을 위해 반사신호에 대한 진폭과 위상을 동시에 획득할 수 있는 쿼드러춰 검출기를 사용하여 초음파현미경 시스템을 구성한다. 본 실험에서 사용된 시험편은 두 종류로서 첫 번째 시험편은 원전재료와 동일한 스테인레스 강으로된 기준 시험편과 원전의 가

[†]E-Mail : cspark1@kaitec.co.kr

동 전, 중에 사용되는 대비 교정 시험편으로 구분하여 영상 복원 기술을 적용하였다.

2. 공간 주파수응답 대역 확장에 의한 초음파 영상개선

기존의 초음파현미경 시스템에서는 동작주파수로 단일 주파수를 사용하여 초음파영상을 획득하여 왔다. 따라서 음향렌즈가 고정된 상태에서 깊이 방향의 분해능은 오직 초음파변환기의 초점에 의한 영상특성에 의해 좌우되었다.^{8,9)} 일반적으로 변환기가 광대역의 특성을 갖을수록 좋은 영상 분해능을 갖는다. 기존의 초음파현미경 시스템에 비하여 깊이 방향 분해능을 향상시키기 위해서는 초음파변환기의 중심주파수 근처대역에서 동일한 간격을 갖는 몇 개의 주파수들을 선정, 동작시켜 이를 합성함으로써 가능하다.¹⁰⁾ 선정된 주파수들에서 동작시킴으로써 현미경에 의해 얻어지는 공간주파수응답 대역이 이동되고 확대된다. 이러한 개선을 위해서는 초음파현미경을 동작시키면서 반사 신호의 진폭과 위상을 동시에 측정해야 한다.

2.1 3차원 공간주파수응답

영상화하려는 결함이 시험편의 표층부에 존재하는 경우, 획득된 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 초음파변환기의 수직위치이고, z' 는 시료 내 결함의 수직위치좌표이며, g 는 측정된 초음파영상, f 는 피사체의 초음파영상특성, h 는 z' 평면에 있는 시료 내 결함에 대한 초음파변환기의 2차원 PSF(Point Spread Function)이다. 물과 같이 일정한 매질 내에 담겨진 물체에 대해서 2차원 PSF은 z 방향으로 공간에 대해 변함이 없다. 따라서 PSF은 식 (2)와 같이 오직 초음파변환기의 z 좌표와 영상화되어지는 결함 사이의 상대적인 거리 차이에 의존한다.

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

2차원 PSF들은 하나의 3차원 PSF에 의해 식 (3)처럼 대치될 수 있다.

$$h(\vec{R}) \equiv h(\vec{r};z) \quad (3)$$

식 (1)에 3차원 공간 좌표에 대한 컨벌루션을 적용하면 식 (4)처럼 정리된다.

$$g(\vec{R}) = h(\vec{R}) * f(\vec{R}) \quad (4)$$

공간주파수영역에서 컨벌루션은 식 (5)와 같이 대수적

인 곱의 형태로 바뀐다.

$$G(\vec{k}) = H(\vec{k})F(\vec{k}) \quad (5)$$

송수신 초음파변환기의 PSF인 $h(\vec{R})$ 는 3차원 송수신PSF과 수신PSF의 곱으로 식 (6)과 같다.

$$h(\vec{R}) = s_{10}(\vec{R})s_{01}(\vec{R}) \quad (6)$$

영상 스펙트럼의 개념으로부터 3차원 공간주파수영역에서 식 (6)은 식 (7)과 같이 전송계수와 반사계수에 대한 공간주파수 스펙트럼의 컨벌루션으로 변형된다.

$$H(\vec{k}) = S_{10}(\vec{k}) * S_{01}(\vec{k}) \quad (7)$$

횡방향에 대한 파수(wave number), \vec{k}_r 와 비 초점거리 z 항에 의해 단방향으로 전송되는 공간주파수응답(SFR)은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$S_{10}(\vec{k}_r; z) = S_{10}(\vec{k}_r; 0)e^{ik_z z} \quad (8)$$

식 (8)의 지수부분은 k_z 영역에서 델타함수로 변형되며, 따라서 스펙트럼은 식 (9)와 같이 된다.

$$S_{10}(\vec{k}) = S_{10}(k_x, k_y)\delta(k_z - \sqrt{k_\omega^2 - k_x^2 - k_y^2}) \quad (9)$$

여기서 k_ω 는 각주파수 ω 에서 초음파의 파수(wave number)이다. k 에 붙은 아래첨자들은 $k = |\vec{k}|$ 과 혼동을 피하기 위하여 사용하였다. 식 (9)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(10)에 의해 주어지는 구의 표면부분이다.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega}{c} \quad (10)$$

아래방향과 측방향에서 기저대역의 범위는 초음파변환기의 수용각(acceptance angle), θ_a 에 의해 결정되어지며, 여기서 최대 측방향 공간주파수, k_{rmax} 에 의해 식 (11)과 같이 주어진다.

$$\sin(\theta_a) = \frac{k_{rmax}}{k} \quad (11)$$

반사형 초음파현미경에서는 하나의 초음파변환기를 가지고 송수신을 함께 사용하므로 수신하는 SFR, S_{01} 은 송수신SFR와 같은 기저대역을 가진다. Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 두개의 공간스펙트럼을 컨벌루션하면, 기저대역은 단방향응답의 폭과 높이의 두 배가 된다. 그러므로 양방향 기저대역(two-way base of support)은 식 (12)와 같이 반지름이 두 배인 구에 의해 경계를 이룬다.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{2\omega}{c} \quad (12)$$

2.2 초음파 영상에서 깊이 분해능의 개선

초음파 영상에서 분해능의 개선정도는 공간주파수영역에서 보다 쉽게 가시화(可視化)시킬 수 있다. 획득 가능한 최대 깊이 분해능은 초음파영상의 SFR(Spatial Frequency Response)에 의해 채워지는 공간주파수영역의 범위에 의해서 결정된다. 이 영역을 SFR의 기저대역(Base of support)이라고 부르며 이 영역밖에 존재하는 물체의 스펙트럼은 초음파현미경에 의해 검출이 불가능하다. 이러한 공간주파수 영역의 범위는 획득 가능한 분해능을 제한한다. 반사형 초음파현미경에서 초음파변환기의 형태가 원형이면서 대칭인 경우, 초음파영상의 분해능과 관련된 공간주파수와 동작주파수 사이에는 식 (12)와 같은 관계가 있다. 깊이 방향, 즉 z축에 대한 공간주파수에 대해서 횡방향 벡터성분을 x, y성분으로 분리하여 정리하면 식 (13)과 같이 표현된다.¹¹⁻¹²⁾

$$k_z = \sqrt{(k^2 - (k_x^2 + k_y^2))} \quad (13)$$

식 (13)에서 보면 동작주파수 f의 변화에 의해 공간주파수가 변화하게 되고, 이 변화는 깊이방향 분해능을 결정짓는 k_z성분의 변화를 유도한다. 이 때 횡방향 분해능은 식 (14)와 같다.

$$k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (14)$$

초음파현미경에서 영상분해능을 결정짓는 공간주파수 응답(SFR ; spatial frequency response)의 기저대역은 Fig. 2와 같다.²⁾

Fig. 2는 3개의 다른 동작주파수에서 동일한 초음파변환기를 동작시켰을 때 각각의 동작주파수에 대한 공간주파수 응답을 표시하고 있다. 공간주파수 k₁, k₂, k₃에 대해 횡방향은 a₁, a₂, a₃의 대역폭을 가지며, 깊이 방향의 대역폭은 각각 b₁, b₂, b₃를 갖는다. SFR의 상측 경계는 2.1의 식 (12)에서 설명한 것과 같고, 하측 경계는 초음파변환기의 f-number에 의해서 결정된다. 만일 초음파 변환기가 다른 동작주파수에서 사용된다면 k_z방향으로 기저대역이 천이 될 것이다. 이러한 공간스펙트럼들을 합

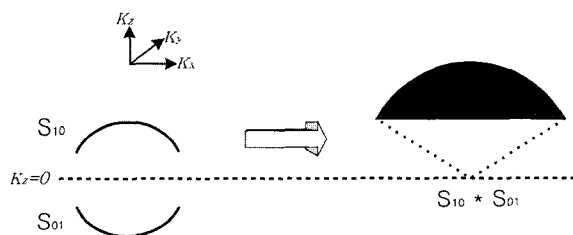


Fig. 1. Convolution of transmitting and receiving spatial frequency

성하면 단일주파수에서 동작시키는 것에 비하여 기저대역이 확장 될 것이다. 특히 Fig. 3에서의 결과를 통하여 보면, 상대적으로 높은 주파수에서는 동작주파수 변화에 의한 빔폭의 변화가 작으므로 빔폭에 의해 결정되는 횡방향 분해능은 거의 차이를 나타내지 않는다. 그러나 z 방향인 깊이 방향에 대해서는 식 (13)의 관계에 의해 상대적으로 높은 주파수에서는 동작주파수 변화에 의한 빔폭의 변화가 작으므로 빔폭에 의해 결정되는 횡방향 분해능은 거의 차이를 나타내지 않는다. 그러나 z방향인 깊이 방향에 대해서는 식 (13)의 관계에 의해 상대적으로 기저대역폭이 크게 향상되어 W로 확대됨을 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 에 대한 공간주파수 대역폭의 증가는 초음파변환기의 대역폭과 부착된 음향렌즈의 최대 개구면에 의해 결정되기 때문에 증가시킬 수 있는 최대 범위도 초음파변환기의 특성에 의해서 제한을 받는다.

영상을 조합하는 방법은 초음파현미경의 동작주파수를 초음파변환기의 대역폭 내에서 변화시켜 얻어진 영상 스펙트럼을 조합하여 얻을 수 있으며 i번째 단일 주파수를 사용하여 얻어진 영상스펙트럼은 식 (15)와 같다.

$$G(\omega_i; \vec{k}) = H(\omega_i; \vec{k})F(\vec{k}) \quad (15)$$

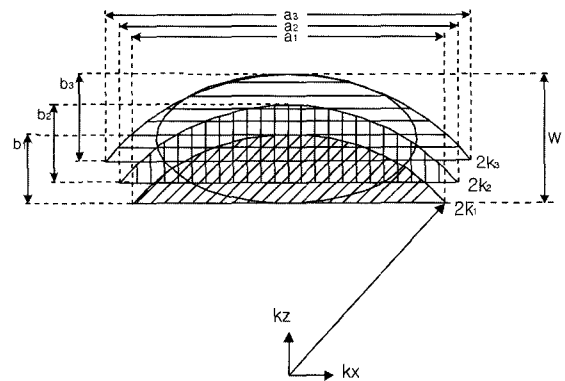


Fig. 2. Bases of support for the microscope' spatial frequency response operating at three different frequencies superimposed

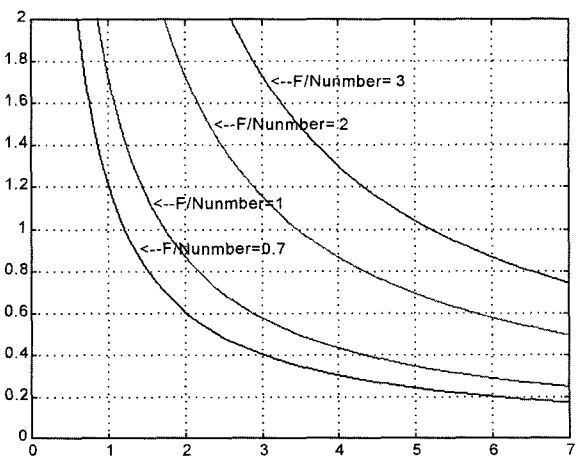


Fig. 3. Beam width in accordance with variation of acoustic lens and operating frequency

초음파현미경에 의해 측정된 영상의 공간스펙트럼 $G(\omega; \hat{k})$ 은 피사체의 영상특성 $F(\hat{k})$ 과 초음파현미경의 공간주파수 응답 $H(\omega; \hat{k})$ 의 곱의 형태로 나타낼 수 있다. 즉, 주파수 ω_i 가 변할 때마다 초음파현미경의 공간주파수 응답이 변화하게 되고 따라서 측정되어지는 영상의 공간스펙트럼 또한 변화된다. 식 (15)를 동작주파수를 변화시키면서 획득한 영상들에 대한 행렬방정식의 형태로 표현하면 다음 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} G(\omega_1; \hat{k}) \\ \dots \\ G(\omega_N; \hat{k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\omega_1; \hat{k}) \\ \dots \\ H(\omega_N; \hat{k}) \end{bmatrix} [F(\hat{k})] \quad (16)$$

식 (16)을 행렬 표기법으로 표기하면 식 (17)과 같다.

$$G_{\hat{k}} = H_{\hat{k}} F_{\hat{k}} \quad (17)$$

식 (17)에 최소자승법을 사용하여 피사체의 영상특성인 $F(\hat{k})$ 에 대해서 정리하면 식 (18)과 같이 되어 피사체의 영상을 얻을 수 있다.

$$F_{\hat{k}} = \frac{H_{\hat{k}}^u G_{\hat{k}}}{H_{\hat{k}}^u H_{\hat{k}}} \quad (18)$$

$F_{\hat{k}}$ 결과는 다른 주파수에서 얻어지는 모든 영상들로부터 계산되어짐으로써 물체 스펙트럼에 대한 최소자승근사가 된다. 변화시키는 주파수 사이의 간격은 한 공간주파수응답(SFR)의 상측 경계와 다른 공간주파수응답(SFR)의 하측 경계가 서로 충분히 겹쳐지도록 해야 한다. k_z 방향으로의 이동은 주파수 변화에 비례하며 식 (19)와 같다.

$$\Delta k = 2 \frac{\Delta \omega}{c} \quad (19)$$

여기서 $\Delta \omega$ 는 식 (20)과 같이 변형된다.

$$\Delta \omega = \frac{c \Delta k}{2} \quad (20)$$

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

3. 결과 및 고찰

3.1 초음파현미경 시스템 구성

개선된 초음파영상을 얻기 위해서는 초음파현미경의 동작주파수를 가변시키면서 획득한 영상들에 대한 진폭과 위상정보가 필요하다. Fig. 4는 진폭과 위상정보를 동시에 획득할 수 있도록 구성된 쿼드러춰 초음파현미경 시스템의 블록선도를 보이고 있다. 쿼드러춰 검출기를 사용하는 시스템은 크게 초음파변환기, 신호발생부, 반사신호 검출부, 스캐닝시스템, 데이터획득 및 초음파 영상처리부로 구성된다.

리부로 구성된다.

시료에서 반사된 음향파의 진폭과 위상 성분을 검출하기 위한 장치는 믹서, 저역통과필터, 증폭기, 그리고 A/D변환을 위한 양극성 피크홀드회로로 구성된다. Fig. 5와 같이 디지털 위상 지연기를 통해 위상변화가 가능한 기준신호는 반사신호와 믹싱된 후 저역통과필터를 통과한다. 필터 후단에는 양자화를 위해 양극성 피크 홀드회로를 부가한다. 본 시스템은 다중 채널로 인한 에러를 줄이기 위해 단일채널을 갖는 쿼드러춰 검출기를 제작하여 동일한 공간적 위치에서 순차적으로 실수부와 허수부를 얻을 수 있도록 제작하였다.

3.2 주파수 변화에 따른 초음파현미경의 $V(z)$ 곡선에 대한 모의실험

깊이 방향의 분해능 개선은 여러 동작주파수에서 계산한 이상적인 $V(z)$ 곡선을 이용하면 공간영역 z 에서 쉽게 비교, 분석된다. $V(z)$ 곡선이 유한 범위를 갖는 함수인 SFR에 따르고 이웃하는 두 곡선의 기저대역이 주파수영역에서 지연될 때 겹치지 않는다고 가정하면 $V(z)$ 곡선은 Figs. 6-8에서와 같이 sinc함수의 형태를 갖는다. 각각의 Figure는 초음파현미경의 동작주파수를 다르게 하였을 때 초음파현미경의 진압 출력곡선인 $V(z)$ 의 변화와 합성된 $V(z)$ 곡선을 모의 실험한 결과이다. Fig. 6은 동작주파수가 5 MHz일 때, Fig. 7은 동작주파수가 5.5 MHz일 때 $V(z)$ 곡선의 변화를 나타낸다. 식 (21)과 같이 Fig. 6과

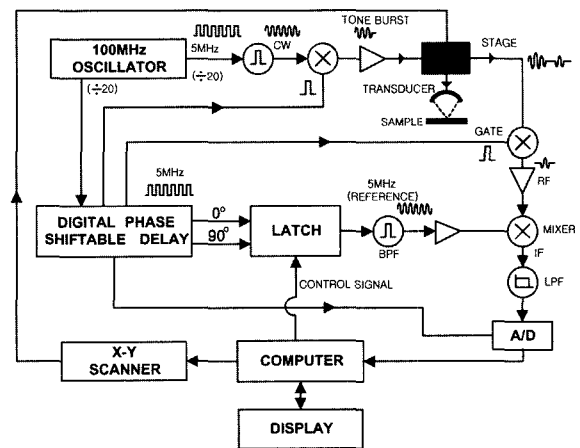


Fig. 4. The block diagram of an acoustic microscope using quadrature detector

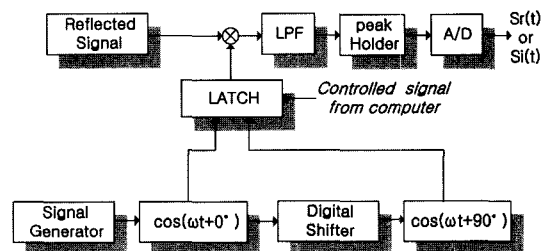


Fig. 5. The block diagram of a quadrature detector

Fig. 7의 $V(z)$ 곡선을 대수적으로 합하면 합성된 $V(z)$ 곡선을 Fig. 8과 같이 얻을 수 있다.

$$V_{\text{sun}}(z) = V_{\omega_1}(z) + V_{\omega_2}(z) \quad (21)$$

Fig. 5, 6과 8을 비교할 때, Fig. 8은 단일주파수를 사용한 경우에 비하여 절반정도의 폭을 갖는 sinc형태의 $V(z)$ 곡선을 얻을 수 있으며, z 변화에 대하여 기울기가 더 급격함을 볼 수 있다. 따라서 시료의 깊이 방향에 대해 보다 민감한 영상을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

3.3 초음파영상 복원 실험

초음파 복원실험은 기준 시험편과 실제 원전의 가동 중 검사에 사용되는 시험편으로 구분하여 적용하였다. 기준 시험편의 내부 원형결함의 깊이에 대한 방향 분해능을 얻을 수 있었으며, 또한 원전의 교정 시험편에 적용하여 밀집도를 높혀 줌으로서 개선된 초음파영상을 복원하였다.

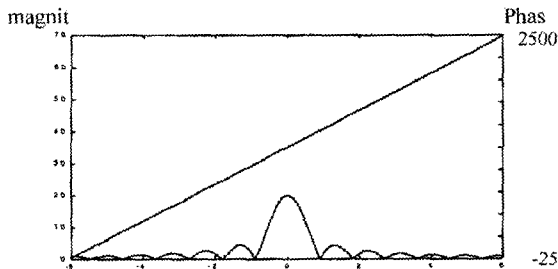


Fig. 6. $V(z)$ curve for 5 MHz operating frequency

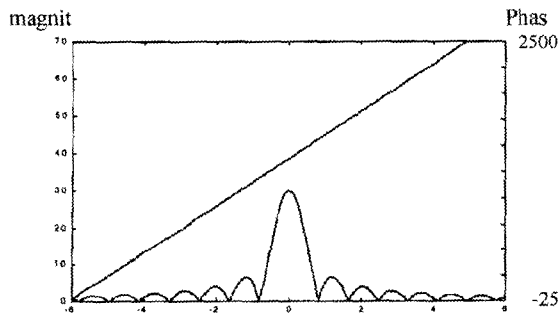


Fig. 7. $V(z)$ curve for 5.5 MHz operating frequency

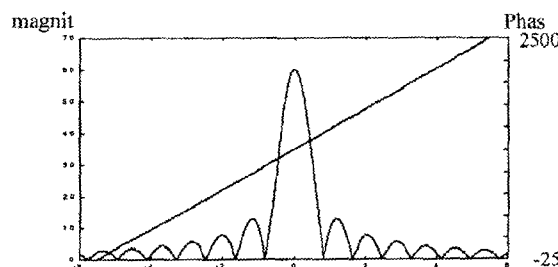


Fig. 8. $V(z)$ curve for multi-operating frequency

3.3.1 기준 대비 시험편

기준 시험편을 이용하여 Fig. 9와 같이 표면에서 결함까지의 깊이가 다르게 위치하도록 하여 4개의 원형결함을 제작한 시험편에 대해서 내부결함에 대한 초음파영상을 복원하였다. 이 시험편의 재료는 원자력 발전소에서 사용되는 오스트나이트계 스테인레스 강 304를 사용하였다. Fig. 9에서 결함 a는 표면으로부터 깊이가 -1.5 mm이고, b는 -2 mm, c는 -2.5 mm, d는 -3 mm이다. 따라서 높이가 다른 내부 결함에 대해 높이에 따라 다른 영상 강도가 측정된다면 이를 통해 내부 결함에 대한 깊이 방향 분해능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)는 개선 전과 개선 후의 영상으로 이미지 필드는 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 로 하였으며 픽셀간의

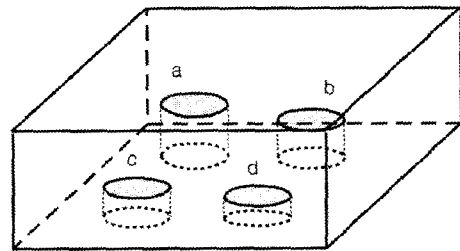
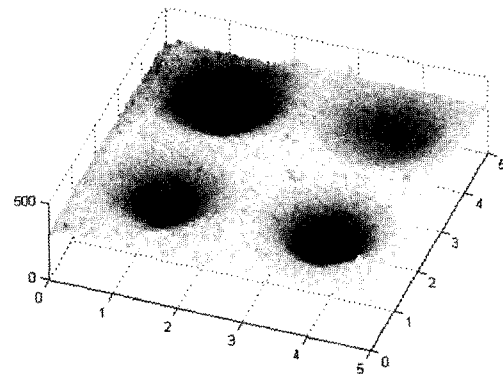
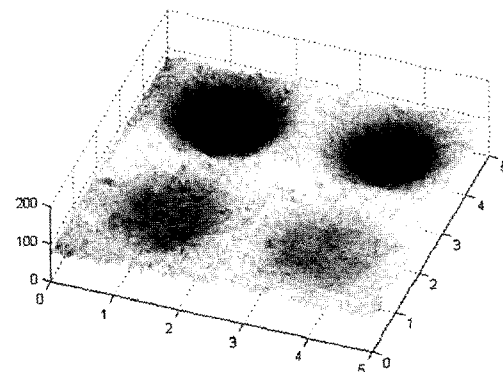


Fig. 9. Drawing of the sample with subsurface defects



(a) Operating frequency : 5MHz



(b) Operating frequency : 4.4MHz~5.6MHz

Fig. 10. Inner mesh image reconstructed by operating SAM (Depth of defocusing: -3 mm)

간격은 50 μm 로 하였다. 한편 디포커싱 깊이는 초점($z=0$)에 대하여 -3 mm시켜 얻었다. Fig. 10(a)는 단일주파수를 사용하여 얻어진 고체 내부영상이다. 결함의 깊이가 다름에도 불구하고 거의 유사한 영상강도를 나타내고 있으며 결함의 형태는 나타나고 있으나 깊이는 알 수 없었다. Fig. 10(b)는 동작주파수를 4.4 MHz에서 5.6 MHz까지 200 MHz씩 가변 시키면서 획득한 영상 데이터들을 합성하여 얻어진 영상이다. Fig. 10(b)에서 보면 결함이 존재하고 있는 깊이에 따라서 영상강도가 다르게 나타나고 있으며 결함이 존재하는 면이 각각 다름을 알 수 있었다.

Fig. 10(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 물론 결함이 존재하는 면에 대한 예측이 가능하였다.

3.2.2 원전의 대비 보정 시험편

두 번째 시험편은 원전의 모재와 동일한 대비 보정 시험편으로서 Fig. 11과 같다. 이 시험편은 시편의 두께의 위치에 따라서 3개의 측면공으로 구성되며, 그 측면공의 직경은 4.5 mm이다. 본 실험에서는 영상 복원 실험을 위해서 사용된 측면공은 시험편의 표면 상층부로부터 가까운 거리에 있는 1/4T와 1/2T 위치의 측면공에 적용하였다. 1/4T 측면공은 표면으로부터 깊이가 -1.4 cm이고, 1/2T는 -3.1 cm이다. 3/4T 측면공은 깊이에 따라서 감쇄 계수가 급격히 증가하여 신호 대 잡음비가 급격히 떨어지므로 영상복원에 적용하지 못하였다. 깊이가 다른 1/4T와 1/2T 측면공에 대해서 Fig. 12는 단일 동작 주파수 5 MHz에서 얻은 단면의 복원 영상이고, 이때 1/4T의 측면공의 영상은 x 좌표 상에서 90~108에 위치하여 약 18의 범위를 갖으며, y 좌표 상에 측면공의 영상은 13-18에 위치하여 약 5의 범위를 갖는다. 또한 1/2T의 측면공의 영상은 x 좌표 상에서 60~78에 위치하여 약 18의 범위를 갖으며, y 좌표 상에 측면공의 영상은 4-10에 위치하여 약 6의 범위를 갖게 되었다. Fig. 13은 다중 주파수 4.4 MHz~5.6 MHz에서 얻은 단면의 복원 영상이다. 이때 1/4T의 측면공의 영상은 x 좌표 상에서 97~105에 위치하여 약 8의 범위를 갖으며, y 좌표 상에 측면공의 영상은 14-17에 위치하여 약 3의 범위를 갖는다. 또한 1/2T의 측면공의 영상은 x 좌표 상에서 60~75에 위치하여 약 5의 범위를 갖으며, y 좌표 상에 측면공의 영상은 5-8에 위치하여 약 3의 범위를 갖게 됨을 알 수 있었다. 두 주파수에 따라서 각각의 시험편 측면공에 대한 복원 영상은 각각의 좌표 범위에 따라서 비교하였다. 이들 영상처리된 좌표 값의 단위는 실제 거리 단위와 일치하지 않고 단지 결함 크기에 상대값을 갖는다. 이들 비교에 의해서 단일 동작 주파수를 적용한 경우 1/2T 신호의 패턴은 신호의 진폭 분포가 산란된 영상으로 나타내었으나 다중 주파수를 적용

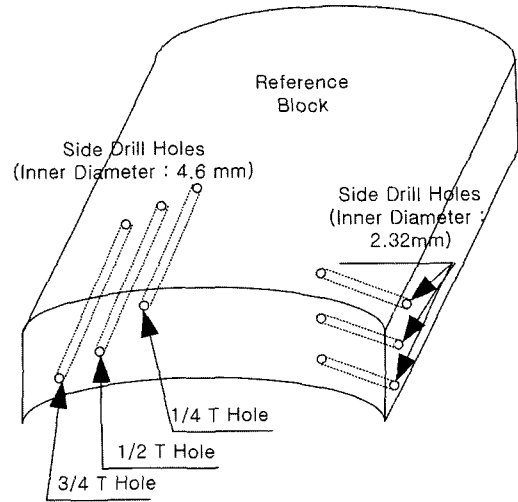


Fig. 11. Drawing of the a sample 2 (Reference Cal. Block)

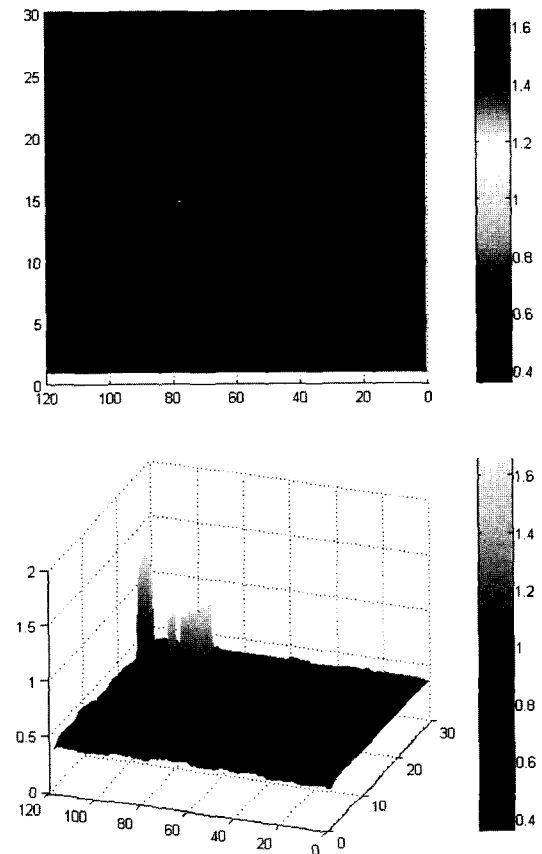


Fig. 12. Sectional image reconstructed for 1/4T and 1/2T hole with a single frequency(Operating frequency : 5 MHz)

한 경우 1/4T와 1/2T 모든 측면공에서 신호 진폭이 밀집되어 보다 개선된 영상 강도를 얻을 수 있었다. 이 시험편에서도 높이가 다른 내부 결함에 대해 높이에 따라 다른 영상강도가 측정된다면 이를 통해 내부 결함에 대한 깊이 방향 분해능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

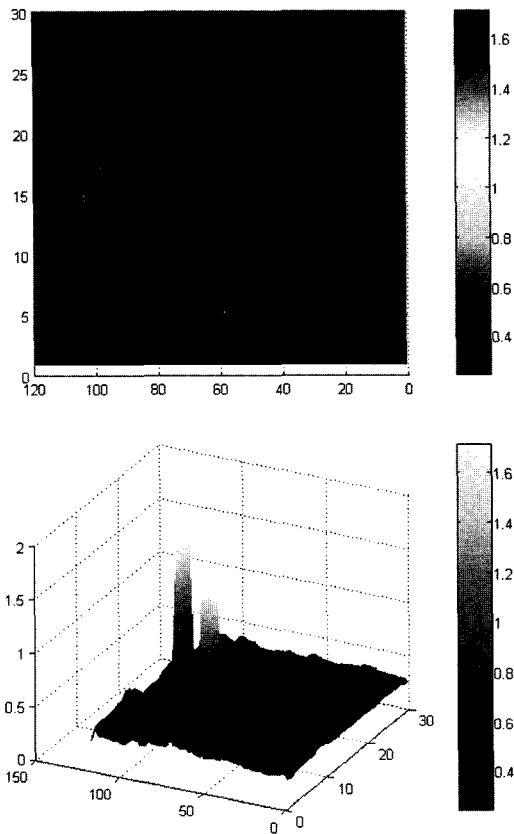


Fig. 13. Sectional image reconstructed for 1/4T and 1/2T hole with multi-frequencies Operating frequency : 4.4 MHz~5.6 MHz)

4. 결 론

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 검출기에 이용한 반사형 초음파현미경 시스템을 구성하였다. 이 영상 복원 실험은 두 종류의 시험편에 적용하였다.

1) 첫 번째 시험편은 원전의 재료와 동일한 재료로서 기저 내부 원형 모양의 결함(Trench)을 갖고, 단일 동작주파수를 사용하여 획득한 영상에서는 결함이 존재하는 영역과 그렇지 않은 영역 사이의 영상강도 차가 0.076로 작게 나타난 반면, 4~6 MHz에서 100 kHz 간격으로 동작주파수를 변화시키면서 획득한 데이터를 합성하여 복

원한 영상에서는 영상강도의 차가 0.285으로 단일주파수를 사용한 것에 비해 약 3.75배가 향상되어 나타났다.

또한, 첫 번째 시험편에서 깊이가 다르게 제작된 4개의 내부 원형결함에 대해 살펴보면 단일주파수를 사용한 경우 복원된 영상에서 결함의 형태는 나타났으나 영상강도의 차를 가지고 결함이 존재하는 깊이는 알 수 없었다. 반면에 동작주파수를 4.4 MHz~5.6 MHz까지 200 kHz 간격으로 가변 시키면서 획득한 영상데이터들을 합성하여 복원한 영상에서는 단일주파수만을 사용한 영상과는 달리 실제 결함의 깊이 차에 따라 영상강도의 차가 다르게 나타났다.

2) 두 번째 시험편은 원전의 재료와 동일한 대비 보정 시험편에 영상 복원기술을 적용하였다. 그 적용 결과로서 깊이가 다른 1/4T와 1/2T 측면공에 대해서 단일 동작 주파수 5 MHz에서 얻은 단면의 복원 영상과 다중 주파수 4.4 MHz~5.6 MHz에서 얻은 단면의 복원영상을 비교하였다. 두 측면공의 복원 영상에서 단일 동작 주파수를 적용한 경우 1/2T 신호의 패턴은 신호의 진폭 분포가 산란 영상으로 나타내었으나 다중 주파수를 적용한 경우 1/4T와 1/2T 모든 측면공에서 신호 진폭이 밀집되어 보다 개선된 영상 강도를 얻을 수 있었다.

3) 따라서 다중주파수를 사용할 경우 첫 번째 시험편과 두 번째 시험편은 초음파영상의 깊이 변화에 대한 영상의 콘트라스트가 향상됨을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. G. S. Kino, Acoustic waves, Prentice-Hall (1987).
2. D. J. Rugar, Appl. Phys. **56**, 1338, Sep. (1984).
3. B. Carlin, Ultrasonics, McGraw-Hill, New York 1949.
4. R. C. McMaster, Nondestructive Testing Handbook vol. II, New York: Ronald (1959).
5. A. Abdullah, Acoustic Reflection Microscope, Ph. D. dissertation, Stanford Univ. (1978).
6. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds., Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 6A, New York: Plenum Press (1987)
7. J. D. Fraser, The Design of Efficient Broadband Ultrasonic Transducers, G.L. Report No. 2973, Stanford University, May (1979)
8. R. D. Weglein and R. G. Wilson, Electron. Lett. **14**, pp. 352-363, June (1978)
9. M. Spencer, Fundamentals of Light Microscopy, Cambridge: Cambridge University Press (1982)
10. A. V. Oppenheim, Signal and system, Prentice-Hall (1983)
11. A. Briggs, Acoustic Microscopy, Oxford (1992)
12. L. W. Kessler and D. E. Yuhas, Proc. IEEE, **67**, 4 87, 526 (1979)