

축 방향 공간주파수 대역의 확장을 통한 Stainless Steel 내부영상의 개선

The enhancement of inner stainless steel image by the bandwidth increment of vertically spatial frequency

구 길모*, 김 상 백*, 김 현**, 박 치 승***, 김 선 진****

* 한국원자력 연구소, **부천대학, **(주)카이텍, ***한양대학교

*,** 대전직할시 유성구 덕진동 150

*** 경기도 부천시 원미구 신곡동 424

**** 서울특별시 성동구 행당동 17

요 약 문

원전의 1차 계통 건전성 확보를 위한 초음파 검사는 재료의 구조 및 형상에 따라 제한을 받게 된다. 재료의 결정립의 크기는 산란잡음의 원인이 된다. 본 논문은 축 방향 공간주파수 대역의 확장을 통하여 원전 모재와 동일한 스테인레스 스틸 시험편의 내부 영상을 개선코자한다. 일반적으로 초음파 현미경에서 획득한 초음파 영상은 단일 동작 주파수를 사용하여 획득하였으며 분해능은 동작주파수와 초음파변환기에 결정되는 공간주파수의 대역에 의하여 제한되어 졌다. 본 연구에서는 초음파현미경에서 동작주파수를 변화시키면서 획득한 영상들을 합성하여 공간주파수의 축 방향 대역을 확장시킨 개선된 영상을 얻는 방법에 대하여 연구하였다. 실험에서는 동작주파수가 5MHz이고 비대역폭이 35%인 초음파변환기를 사용하여 초음파현미경 시스템을 구성하였고, 이러한 처리를 위해서는 진폭과 위상영상 데이터가 필요하기 때문에 진폭과 위상을 동시에 획득할 수 있도록 검출기로서 쿼드러춰 검출기를 사용하였다. 시험편의 내부형상은 표면으로부터 깊이를 다르게 하여 내부에 4개의 원형결함을 제작하였다. 실험결과 단일 주파수를 사용한 경우에는 결함의 형태는 나타났으나, 고체 내부 결함의 깊이와 영상강도의 변화가 비례하여 나타나지 않은 반면에 개선된 영상에서는 깊이 변화에 대해서 영상 강도의 변화가 비례하여 출력되었다.

Abstract

The ultrasonic test for maintaining the integrity of the primary loop in nuclear power plants is restricted by the structure and shape of the material. The size of material crystalline becomes the cause of scattering noise. In this paper, the internal image of stainless steel specimen same material nuclear power plants is to be improved through the band width increment of the verify spacial frequency. Generally, the ultrasonic image obtained from ultrasonic microscope is acquired using a operational frequency and the resolution is confined by the spacial frequency determined by the operational frequency and ultrasonic convertor. In this study, an improved image acquiring method was investigated, which was obtained from synthesizing the images varying the operational frequency in the ultrasonic microscope and then increasing the vertically spatial frequency bandwidth. In the experiment, an ultrasonic microscope was assembled using an ultrasonic convert of which operational frequency was 5MHz and ratio bandwidth is 95%, and a

quadrature detector is used to acquire the amplitude and phase simultaneously because the amplitude and phase image data are required for the signal processing. A specimen with four round flat type for detector was fabricated, which is in different depths. Although the shape of the defects was appeared using a single frequency, the strength of the images was not proportional to the depth of the defects. On the other hand, the strength of the images was proportional to the depth of the defects in the improved image.

1. 서론

원전의 1차 계통 배관은 오스나이트계 스텐레스 강으로서 구성되어 있다. 발전소의 가동년 수가 증가함에 따라서 1차 배관 재료의 미세성 결함이 성장하게 된다. 이러한 미세한 크랙성 결함은 ASME Code Section XI, App. VI 89 Edition에서 요구한 초음파 검사 방법으로는 그 실효성이 문제점으로 제시되었다^[1]. 또한 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 원전의 안전진단 뿐만 아니라 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.^{1,2)}

이러한 초음파현미경은 일반적으로 단일 주파수를 사용하여 초음파 영상을 복원한다. 이때 동작주파수가 일정하다면 음향렌즈에 결정되는 축 방향 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.³⁾ 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 검출기로서 쿼드러춰 검출기를 사용하여 초음파현미경을 구성하였고, 이때 초음파변환기는 비대역폭이 35%이고 중심주파수가 5MHz인 변환기를 사용한다. 시편으로는 스텐레스 스틸을 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 결정되고, 특히 음향렌즈와 동작주파수에 의하여 결정된다. 일반적으로 초음파 영상을 얻기 위해서는 초음파변환기의 중심주파수를 동작주파수로 사용하여 스텐레스 스틸 내부의 영상을 획득하기 위해서는 그림 1에서와 같이 디포커싱 모드에서 스캔하여야 한다.

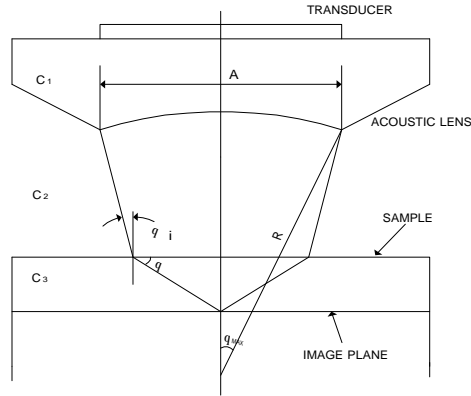


그림 1. 디포커싱 동작모드

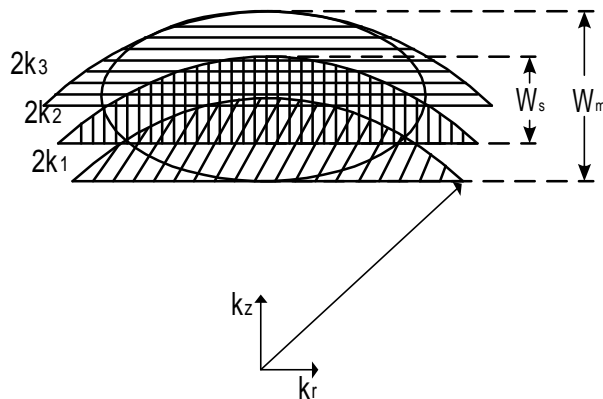


그림 2. 3개의 다른 주파수를 중첩할 때 초음파현미경의 공간 주파수 응답의 기저대역

초음파변환기에서 여기된 초음파는 그림 1에서 보여진 바와 같이 음향렌즈에 의해서 집속이 되어지며, 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 빔폭이 다르게 나타난다. 개구면의 각도와 동작주파수 변화에 대한 빔폭의 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.^{4,5)}

이와같은 횡 방향 분해능은 최대 개구면의 크기와 각도에 의해서 결정되며 또한 깊이 방향 분해능과 관계된다. 이러한 관계는 공간주파수 영역에서 살펴보면 보다 쉽게 설명 될 수 있

다. 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. 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 파수는 식(2)와 같이 정의된다.

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

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

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

만일 초음파현미경에서 초음파변환기의 대역폭 범위 내에서 동작주파수를 변화시킨다면 초점거리와 빔 폭이 변화하게 되며 식(1)에 의해서 공간주파수의 지지대역도 변화하게 되어 k_H 과 k_z 도 이에 따라서 변화하게 된다. 그림 2는 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 갖는 반면에 k_z 에 대한 변화는 다르게 나타남을 볼 수 있다. 이는 초음파변환기를 고주파에서 동작시킬수록 k_H 가 음향렌즈에 의해서 결정되기 때문이다. 따라서 동작주파수를 변화시키면 식(1)과 (3)의 관계식에서 k_z 방향의 지지대역에서 천이가 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 1에서와 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 영상스펙트럼은 식(4)와 같다.

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

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 ω_i 이다.

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

식(5)는 첨자가 표시된 식으로 표기 할 수 있으며 식(6)와 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. $\mathbf{F}_{\vec{k}}$ 는 다른 주파수를 사용하여 획득한 모든 영상으로부터 피사체에 가장 근사한 결과를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{F}_{\vec{k}} = \frac{\mathbf{H}_{\vec{k}}^u \mathbf{G}_{\vec{k}}}{\mathbf{H}_{\vec{k}}^u \mathbf{H}_{\vec{k}}} \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{H}_{\vec{k}}^u$ 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.

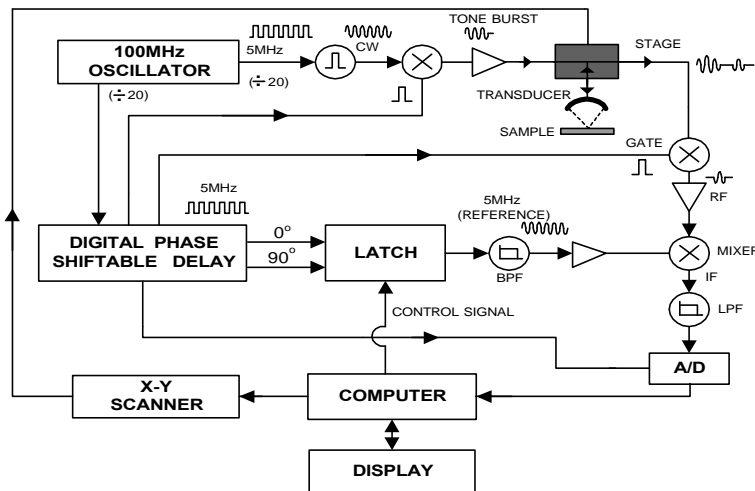


그림 3. 쿼드러춰 검출기를 이용한 초음파현미경의 블록선도

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

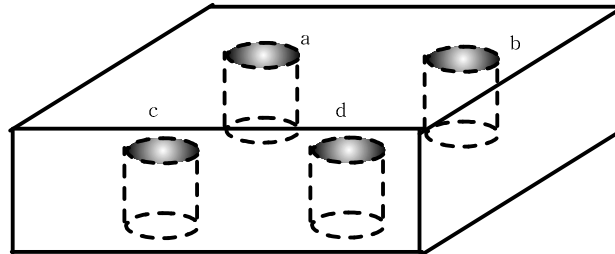


그림 4. 시편의 대략도

그림 4 에서 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 50 μ m로 하였다. 한편 디포커싱 깊이는 초점(z=0)에 대하여 -3mm시켜 얻었다. 그림 4는 단일주파수를 사용하여 얻어진 고체 내부영상이다. 결함의 깊이가 다름에도 불구하고 거의 유사한 영상 강도를 나타내고 있으며 결함의 형태는 나타나고 있으나 깊이는 알 수 없었다.

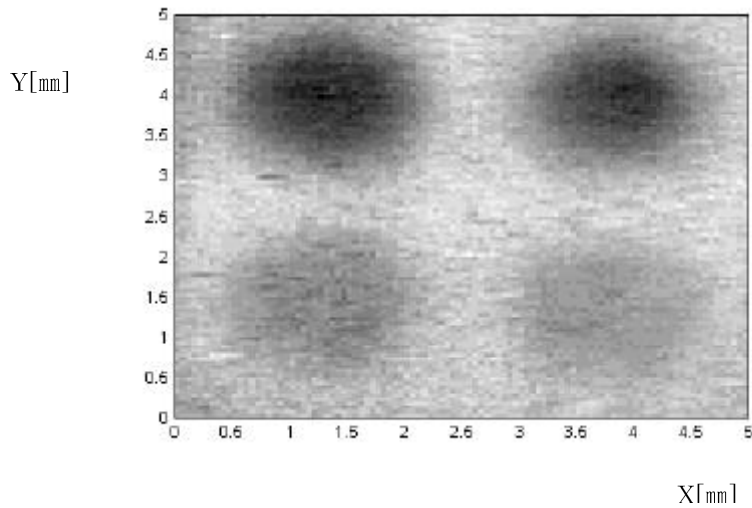


그림 5. 개선된 영상

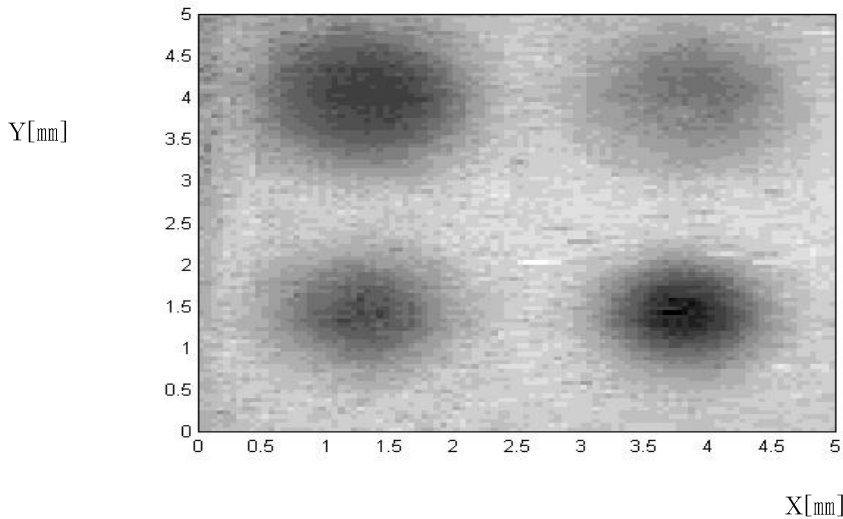


그림 6. 단일주파수를 사용하여 복원된 영상

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 변화가 다르게 나타나고 있으며 결함이 존재하는 면이 각각 다를 수 있다.

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

4. 결 론

본 연구에서는 원전의 1차 계통 배관 재료인 오스트 나이트계 스테인레 스틸 시험편을 사용하여 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 데이터를 합성하여 얻어진 영상에서는 단일 주파수를 사용한 영상과는 달리 결함의 깊이에 따라서 영상강도가 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

이 연구는 과학기술에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. A. Briggs, "Acoustic Microscopy", Oxford, 1992
2. 고대식, "Small aperture형 초음파현미경 시스템의 구성 및 성능해석", 경희대학교 박사학위논문, 1991
3. G.S.Kino, "Acoustic Waves: Devices, imaginag and analog signal processing", PRENTIC-HALL
4. Digital Signal Acquisition & Processing for NDE & Plant Maintenance Workshop, Sponsored by EPRI & Hosted by the EPRI NDE Center, Jul 31-Aug 3, (1990)
5. 구길모, 전계석, "SSP MPO 알고리즘을 이용한 초음파 결정립 잡음억제에 관한 연구", 한국음향학회지, 제15권, 제6호, pp. 81-89 (1996)
6. P.Reinholdtsen, "Remove the effects of surface in acoustic microscopy", IEEE. Ultrasonic Symposium, pp.756-763, 1986
7. Auld, B. A., "Acoustic fields and waves in solids", NY: Wiley, 1973.
8. Philip Denbigh, "System analysis & signal Processing", Addison-Wesley
9. Jae S.Lim, "Two-dimension Signal and image processing", Prentice-Hall, 1990