

산란체를 이용한 3차원 영상 구현 이론의 연구

채성옥*, 전계석*

* 경희대학교 전자공학과

A study on three-dimensional image formation theory by using scatterers

Sung-Ouk Chae*, Kye-suk Jun*

* Dept. of Electronic Engineering Kyunghee UNIV.

e-mail: coolice@hanmail.net

요 약

초음파 영상의 3차원 구성은 기존의 2차원 영상에서는 얻을 수 없었던 결합의 깊이, 방향성 등의 정보를 획득할 수 있기 때문에 최근에 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 본 연구에서는 SAM(Scanning Acoustic Microscope)의 각 스펙트럼(angular spectrum) 접근법을 사용하여 물체에서의 3차원 영상 구현 이론에 대해서 연구하였다. 이러한 방법은 초음파 트랜스듀서를 디포커싱시키면서 얻어진 2차원영상 정보를 이용하여 3차원으로 구성하는 방법이다. 실험에서는 알루미늄 원형 시료를 사용하였고, $V(z)$ 이론을 이용하여 산란된 신호에서의 영상을 구현하는 데 초점을 두었다.

모의 실험을 통하여 피사체 중심에 대해서 70° 범위 내에서 반사형 초음파 현미경으로 영상을 얻어낼 수 있음을 확인하였다. 중심주파수가 5MHz이고 대역폭이 35%인 트랜스듀서를 사용하여 원형 시료의 중심부에서의 영상을 얻어 내었다.

1. 서론

산업사회의 고도화에 따라 안전성과 초정밀을 요구하

는 반도체 분야, 항공우주 산업분야, 원자력 발전 분야에서 초음파를 이용한 비파괴 검사는 제품의 품질 관리와 신뢰도 측면에서 매우 유용하다. 특히 의학분야에서는 진단과 치료의 목적으로 인체의 각 부분을 신호 해석하여 영상 처리하는 3차원 의료 영상 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. Rayleigh파 발진의 효과는 영상의 세밀한 구조를 살펴봄으로써 영상 구조에 관한 물체의 탄성 특성을 알 수 있게 해주므로, 이 이론을 초음파 영상 진단과 초음파 비파괴 검사에 적용할 수 있다. 피사체 단면의 산란 스펙트럼은 2차원을 갖는 불연속들의 영상 콘트라스트(contrast)로 표현될 수 있고, 이는 피사체의 물리적 특성과 밀접한 관련을 갖기 때문에 이에 따르는 산란 스펙트럼의 분포가 물리적 특성에 따라서 다르게 나타난다. 본 연구에서는 피사체에서 강한 산란이 일어나는 경우 산란 문제를 푸는 일반 해를 구하고, 각 스펙트럼(angular spectrum) 접근법을 이용하여 3차원 물체에서의 영상을 구성한다. 모의 실험을 통하여 피사체 중심에 대해서 70° 범위내에서 영상을 얻었 내었다. 실험에서 시료는 단순한 3차원 형태인 원기둥을 제작하여 사용하였고, 중심주파수가 5MHz이고 대역폭이 35%인 트랜스듀서를 사용하여 반사형 초음파 현미경 시스템을 구성하여 실험하였다.

2. 각 스펙트럼 접근법에 의한 3차원 물체의 영상 구현 이론

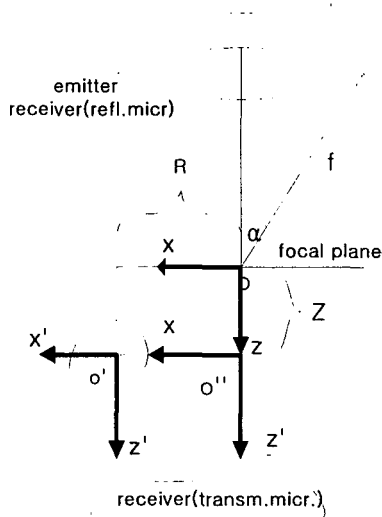


그림1. 시료에 대한 초음파영상구성 관계

그림 1에서는 시료에 대한 초음파 영상 구성 관계를 보여주고 있다. 트랜스듀서의 초점을 원점으로 하는 $r=(x, y, z)$ 의 3차원 좌표계와 입자(particle)내에 위치하는 입자의 O' 점에서의 $r'=(x', y', z')$ 의 좌표계를 사용하는데, z 와 z' 축은 트랜스듀서로부터 직각을 이룬다. 시스템 O' 의 좌표는 트랜스듀서의 초점으로부터

$r_o=(X, Y, Z)$ 에 위치한다. 반경벡터 $r''=(x, y, z')$ 를 가지는 점 O'' 이 원점이 되는 중간좌표계를 사용한다. SAM에 의해서 구성된 그 차원의 초음파 영상과 각 스펙트럼과의 관계는 식(1)과 같이 표현된다.^[1]

$$V = B \int \int_{-\infty}^{\infty} U_i(-k_x, -k_y) U_s(k_x, k_y) k_z dk_x dk_y \quad (1)$$

여기서 B는 비례상수, $k=(k_x, k_y, k_z)$ 는 전파상수이고, U_i 와 U_s 는 각각 입사장과 산란장의 스펙트럼이다.

초점 평면 U_i 에 입사되는 트랜스듀서에 의한 스펙트럼은 식 (2)와 같다.

$$U_i(k_x, k_y) = 2\pi v_0 f e^{i\omega t} \frac{P(k_x, k_y)}{kk_z} \quad (2)$$

f 는 트랜스듀서의 초점거리이고, $v_0 P$ 는 트랜스듀서 표면에서 진동하는 분자 속도이다. 위치 Z 에서 물체면으로 입사되는 스펙트럼은 전파 성분 $\exp(i k_z Z)$ 을 포함하며 식 (3)과 같다.

$$U_i'(k_x, k_y) = 2\pi v_0 f e^{i\omega t} \frac{P(k_x, k_y)}{kk_z} \exp(i k_z Z) \quad (3)$$

원점 O' 와 O'' 에서의 스펙트럼은 shift theorem에 의해 $x=x'+X, y=y'+Y$ 이므로, 원점 O' 에서의 이동한 물체의 입사 스펙트럼은 식 (4)와 같다.^[2]

$$U_i(k_x, k_y) = U_i'(k_x, k_y) \exp\{i(k_x X + k_y Y)\} \quad (4)$$

물체에 입사하는 스펙트럼을 알고 있다고 가정하고 산란 스펙트럼을 계산해보면, 후방향 산란 스펙트럼 $g_s=(k_x, k_y, k'_x, k'_y)$ 의 밀도는 입사파 $\exp(k_x x' + k_y y')$ 에 대응하는 반사장의 스펙트럼으로 결정되며, 산란 스펙트럼을 계산하기 위해서는 모든 입사 평면 파를 합쳐야 한다. 산란 스펙트럼 U_s' 는 식 (5)와 같다.

$$U_s'(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} U_i'(k'_x, k'_y) g_s(k_x, k_y, k'_x, k'_y) dk'_x dk'_y \quad (5)$$

(3)식과 (4)식을 (5)식에 대입하면 식 (6)과 같은 산란 스펙트럼 U_s' 를 구할 수 있다.

$$U_s'(k_x, k_y) = \frac{v_0 f e^{i\omega t}}{2\pi} \int \int_{-\infty}^{\infty} P(k'_x, k'_y) g_s(k_x, k_y, k'_x, k'_y) \exp\{i(k'_x X + k'_y Y + k'_z Z)\} \frac{dk'_x dk'_y}{kk_z} \quad (6)$$

산란 스펙트럼 $U_s'(k_x, k_y)$ 는 원점 O'' 에서 $\exp\{-i(k_x X + k_y Y)\}$ 를 곱하여 이동한 것이므로 식 (7)과 같이 표현된다.

$$U_s(k_x, k_y) = U_s(k_x, k_y) \exp(-i(k_x X + k_y Y)) \quad (7)$$

후방향 산란 스펙트럼 U_s 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$U_s(k_x, k_y) = U_s(k_x, k_y) \exp(-i k_z Z) \quad (8)$$

최종 반사 SAM의 출력 신호는 식(9)와 같이 표현된다.

$$V(X, Y, Z) = \frac{B v_0^2 f^2 e^{2iV}}{k} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(-k_x, -k_y) P(k_x, k_y) g_s(k_x, k_y, k_x, k_y) \times \exp\{i((k_x - k_x)X + (k_y - k_y)Y + (k_z - k_z)Z)\} \frac{dk_x dk_y dk_z}{kk_x} \quad (9)$$

여기서 B는 비례상수 즉 매질에 대한 특성을 나타내고 pupil함수 $P(k_x, k_y)$ 는 트랜스듀서의 k의 후방향 연장선에 위치하는 점에서 방출되는 장의 세기로 정의된다. [3] 식 (9)로부터 3차원 물체의 각 위치에 대응하는 전압 강도를 알 수 있다.

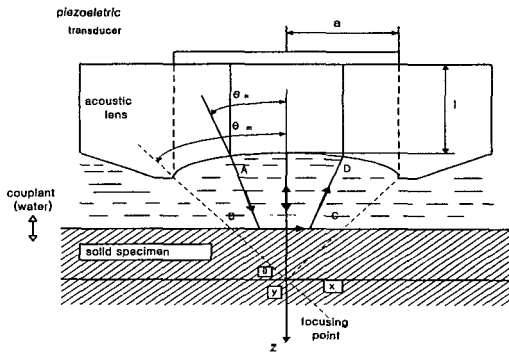


그림 2 SAM의 동작 원리

그림 2는 3차원 영상 획득을 위한 SAM의 동작 과정을 나타내고 있다. 여기에서 f는 트랜스듀서의 초점거리, $u(r)$ 은 트랜스듀서 축에서의 거리 r의 함수로서 후방 초점면에 있어서의 입사파의 진폭 분포와 위상 지연도를 포함하는 복소수이다. $p(r)$ 는 트랜스듀서의 pupil 함수이고, z는 트랜스듀서 초점면과 시료 표면의 거리, 즉 디

포커싱한 양이며, k는 $2\pi/\lambda$ 로서 결합용액(couplant)의 파수이다. θ_m 은 트랜스듀서의 반개구각이고 입사각의 최대치에 해당한다. 이 반사파의 진폭 V를 디포커싱한 z의 함수로써 표시한 그래프를 $V(z)$ 곡선이라고 하고 초음파 영상의 콘트라스트(contrast)와 밀접한 관계가 있다. [4] 트랜스듀서를 디포커싱하여 얻어진 전압 변화를 의미하며, 식(10)과 같다.

$$V(z) = \exp(-2\alpha(f+z)) \int_0^{\sin \theta_m} u(r)^2 p(r)^2 R(r/f) \exp(-ikz(1-r^2/f^2)^{1/2}) r dr \quad (10)$$

이론적으로 시료 표면에 맞춰진 초점으로 스캐닝된 영상은 트랜스듀서의 변조 전달 함수와 똑같은 형태를 가지는 것으로 나타난다. 초점이 시료의 표면을 따라 스캔할 때, 만들어지는 시료 영상의 콘트라스트(contrast)는 식(11)와 같다. [5]

$$V = 2\pi[1 - \cos(\alpha - \beta)] + \int_{\alpha - \beta}^{\arccos(\cos \alpha / \cos \beta)} \sin \theta \left[2\pi - 4 \arccos \left(\frac{\cos \theta \cos \beta - \cos \alpha}{\sin \theta \sin \beta} \right) \right] d\theta \quad (11)$$

4. 실험 및 고찰

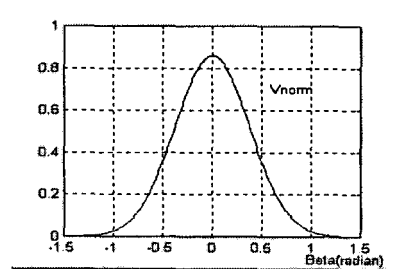


그림 3. 초점이 시료를 따라 스캔할 때, 반사 SAM에서의 정규화된 진폭($\alpha=60$).

시료의 표면에서 스캐닝되는 반사 SAM에서의 정규화된 진폭이 그림 3과 같이 나타난다. 여기서 β 는 탄젠트(tangent)평면의 경사각이다. 위의 그래프에서 보는 바와 같이 $\beta=0$ 에서 최대값을 갖고, 약 $\beta=1.2$ (68.75°)부터는 0에 근접함을 알 수 있었다.

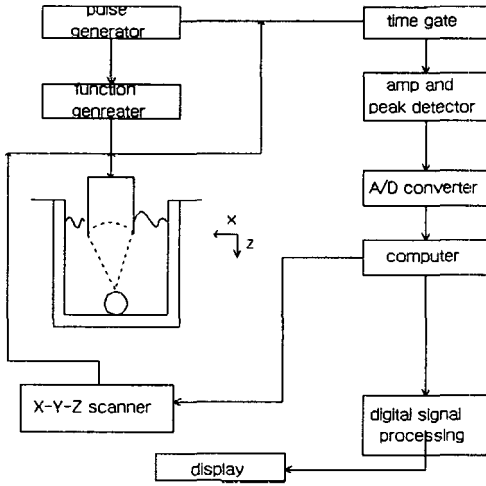
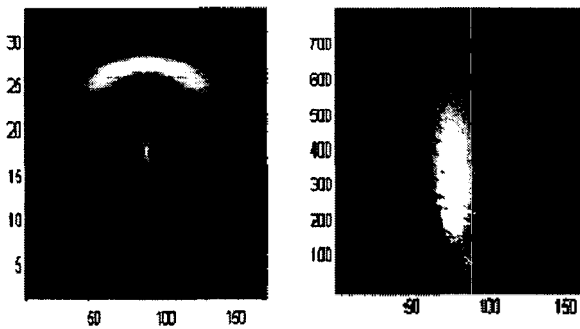


그림4 초음파 현미경 시스템의 블록선도

그림 4는 실험에서 사용한 초음파 현미경 시스템의 블록선도를 보여준다. 본 논문에서 사용된 트랜스듀서는 중심주파수가 5MHz, 비대역폭이 35%, 초점거리 50mm, 렌즈의 구경은 20mm인 small aperture형 트랜스듀서를 사용하여 실험하였다.



(a) 모의 실험 영상 (b) 시료중심에서의 영상

그림 5. 원형 시료에 대한 모의 실험 및 실험 결과

그림 5는 원형 시료에 대한 모의 실험과 실험 결과를 보여준다. 그림 5의 (a)는 식(9)를 이용하여 얻어진 영상으로 그림 3에서 얻어진 결과와 일치함을 확인하였다.

그림 5의 (b)는 중심주파수가 5MHz이고 비대역폭이 35%인 트랜스듀서를 사용하여 얻어낸 원형 시료의 중심부에서의 영상을 보여 주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 초음파 현미경 시스템을 이용하여 산란된 신호에서 영상을 구현하는 이론에 대해서 연구하였고, 영상 구현을 하기 위하여 이론적인 수식을 모의 실험하여 얻은 $V(z)$ 곡선을 보여 주었다. 모의 실험 결과 $\beta=1.2$ (68.75°)까지는 반사형 초음파 현미경 시스템을 이용하여 영상을 얻어 낼 수 있었지만 그 이상의 각도에서는 영상을 얻을 수 없었다. 실험에서의 시료는 지름이 8mm인 원기둥을 이용하였다. 중심주파수가 5MHz이고 대역폭이 35%인 트랜스듀서를 사용하여 원형 시료의 중심부에서의 영상을 얻어 내었다. 향후 연구 과제로서는 투과형 초음파 현미경 시스템을 이용하여 약 $\beta=1.2$ (68.75°) 이상의 각도에서의 영상을 구현하는 방법이 계속 연구되어야 하겠다.

참고 문헌

- [1]. Zinin, W. Weise, O. Lobkis, S. Boseck. "The theory of three dimensional imaging of strong scatterers in scanning acoustic microscopy." Wave Motion. Vol.25. pp.212-235, 1997.
- [2] P. Zinin, W. Weise, O. Lobkis, O. Kolosov, S. Boseck, "Fourier optics analysis of spherical particles image formation in reflection acoustic microscopy", Optik, 98, 1994.
- [3] J.W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hills, San Francisco, 1968.
- [4] K.I. Maslov, P.V. Zinin, O.I. Lobkis, T. Kundu, "V(z) curves formation of solid spherical microparticles in scanning acoustic microscopy", J. Microscopy, 178, 125-133, 1995.
- [5] A. Briggs, Acoustic Microscopy, Clarendon Press, Oxford, 1992.