

압전식 탐촉자의 기계-전기 신호 변환

The Electro-Mechanical Signal Transformation of Piezo-Electric Transducer

안 태 원
Tae Won Ahn*

초 록 전기-기계 상호관계식을 사용하여 시편에서의 산란파를 탐촉자의 전기 신호로 변환시키는 방법을 다루었다. 산란파에 의한 탐촉자의 전기 신호는 입사파와 산란파의 변위, 응력 관계식의 적분으로 표시되었다. 적분 표면은 산란자를 포함하는 닫힌 표면이며 입사파와 산란파의 변위, 응력도 이 표면 좌표에서의 값을 사용한다. 파동해석 결과에서 구한 산란된 파동으로부터 초음파 현미경의 탐촉자 전기 신호를 구했으며 계산 결과를 실험 결과와 비교하였다.

주요용어: 전기-기계 상호관계식, 탐촉자, 전기신호, 입사파, 산란파

Abstract The electromechanical reciprocity identity is introduced to relate the voltage at the terminals of a transducer to the acoustic wavefields scattered from the specimen. The voltage at the terminals of the transducer is expressed as an integral equation in terms of the displacement and stress of the incident and scattered waves on the closed surface enclosing the scatterer. The equation is used to relate the voltage at the terminals of an acoustic microscope's transducer to the acoustic wavefields at the interface between the specimen and the coupling fluid. The voltage calculated using the integral equation is compared with the experimental result.

Keywords: electromechanical reciprocity, transducer, voltage signal, scattered waves, incident waves

1. 서 언

초음파를 이용한 비파괴시험에서는 펄스 형태의 고주파 전기적 신호가 발신탐촉자에 보급되면 탐촉자 표면에서 응력파가 발생하여 시험편을 가진하게 된다. 또, 시험편에서 결함에 의해 발생한 산란파는 수신 탐촉자에서 전기적 신호로 변환되게 된다. 이 신호를 통하여 우리는 결함의 위치, 크기, 성질 등을 규명할 수 있다.

초음파 산란 현상은 경계요소법을 사용하여 해석할 수 있는데 산란자(scatterer)에서 산란된 파동의 변위와 응력을 임의의 위치에서 구할 수 있다. 산란된 파동은 위치에 따라 다른 크기를 갖게 되는데 탐촉자 표면

에서의 변위가 전기적 신호로 변환되면 실험 결과와 쉽게 비교될 수 있다. 탐촉자의 전기적 신호의 크기는 수신 탐촉자의 위치 그리고 탐촉자의 형상 및 크기에 영향을 받게 된다. 초음파 산란 현상 해석을 통하여 얻어진 산란된 파동을 탐촉자의 전기적 신호로 변환하기 위해서는 전기-기계 상호관계식(electromechanical reciprocity relation)이 필요하다.

두 개의 서로 다른 방정식 군에 대한 해를 관련시키는 상호 관계는 19세기에 처음으로 전자기 파동과 탄성 파동에 대하여 기술되었다. 이러한 관계식은 발생자와 수신자의 파동 전달에 대한 대칭성을 설명하는데 사용되었다. 전자기적 파동과 탄성 파동의 상호 관계는 Pri-

makoff와 Foldy에 의해 처음으로 다루어졌다[1]. Primakoff와 Foldy는 전기음향(electroacoustic) 전달 계측에서 발생자와 수신자의 상호 변환 가능성을 보이기 위해 전자기 파동과 탄성 파동을 포함하는 일반적 상호 관계식을 사용하였다.

Auld는 이 관계식과 전기-기계 상호관계식을 사용하여 탐촉자 전기 단자의 발생자에서 수신자로 전달되는 투과계수(transmission coefficient)와 다시 발생자로 돌아오는 반사계수(reflection coefficient)를 유도하였다. 여기서는 전기 단자에서의 산란 계수를 산란자 표면에서 발생자에 의하여 입사하는 파동과 입사파동이 산란자 표면에서 산란된 두 파동의 적분식으로 유도하였다[2]. 이 식은 발생자와 수신자의 변환이 가능하며 한 개의 탐촉자가 발생용과 수신용으로 사용되는 경우에도 적용될 수 있다. 이 해석을 위해 전기-기계 상호관계식이 사용되었고 산란 계수는 발신 탐촉자와 수신 탐촉자의 표면에서 정의되었다.

본 논문에서는 경계요소법을 사용하여 구한 산란된 파동의 변위와 응력을 Auld의 식에 적용하여 산란파에 의한 탐촉자의 전기적 신호의 상대적 크기를 구하는 방법을 보인다.

2. 전기기계 상호관계식(Electromechanical Reciprocity Relation)

발신 탐촉자에서 발생한 탄성 파동이 전파되어 산란자에서 산란되었을 때 산란된 파동의 일부는 수신 탐촉자 표면을 가진하고, 이 기계적 신호가 전기적 신호로 변환된다. 이때 발생하는 탐촉자의 신호는 직접적으로는 탐촉자에 도달하는 탄성 파동 신호가 전기적으로 변환되어 발생하는 것이다. 그러나 산란자에 의한 탐촉자 신호의 크기를 구할 때 적분 구간이 수신 탐촉자 표면이 아니고, 산란자를 포함하는 임의의 닫힌 표면에서의 입사하는 파동의 변위, 트랙선과 산란된 파동의 변위, 트랙선의 적분식으로 표시된다. 여기에서 사용하는 수학적 식은 전자기장과 탄성 파동장의 상호 관계에 대해 B. A. Auld[2]가 유도한 식을 사용한다. 다음은 B. A. Auld의 논문[2]의 내용 중, 전기-기계 상호관계식을 유도한 내용을 간단히 요약한다.

전자기장과 탄성 파동장의 일반적 상호관계식은 압전(piezoelectric), 자기변형(magnetostrictive), 정전기적(electrostatic), 전자기적(electromagnetic) 항목들을 포함한다. 그러나 초음파 비파괴 검사에서는 주

로 압전(piezoelectric) 탐촉자에 관심이 있으므로 압전 현상에 대한 상호 관계식에 국한하여 살펴본다.

압전(piezoelectric) 상호관계는 주파수 ω 를 갖는 시간 조화장의 모든 영역에 대하여 다음과 같은 식이 성립한다. 여기에서 편의상 모든 항에서 시간 조화항 $e^{i\omega t}$ 는 생략한다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \\ = \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{F}_1 - \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{F}_2 + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_{s1} - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_{s2} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기에서 $\mathbf{v}, \boldsymbol{\sigma}$ 는 파동에 의한 입자 속도와 응력을 표시하고 E는 전기장(electric field), H는 자기장(magnetic field)을 나타낸다. 그리고 아래첨자 1, 2는 두 개의 서로 다른 물체력 밀도(body force density) F와 전류 밀도(electric current density) \mathbf{J}_s 가 작용할 때 각각에 대해 두 개의 가능한 해를 표시한다. 물체력 밀도 F가 없고 전류 밀도 \mathbf{J}_s 가 0인 영역에서는 위 식의 우변이 0이 된다.

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

이 식은 전기-기계 상호 관계가 기계적 신호와 오직 압전탐촉자에 의할 때에만 적용 가능하다. 다른 종류와의 상호 관계에 대해서는 다른 관계식이 성립한다.

Fig. 1에서는 발신 및 수신용 압전탐촉자가 산란자를

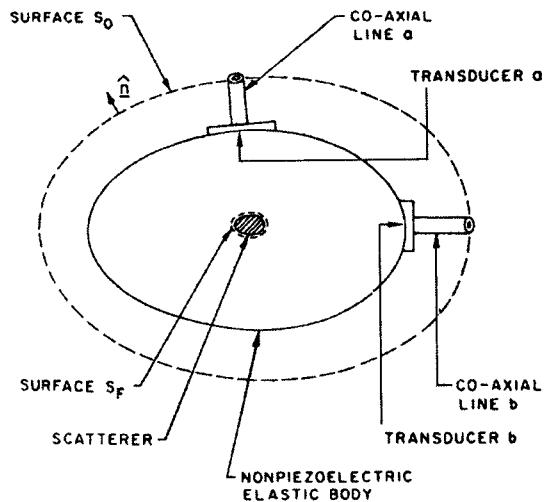


Fig. 1 Scattering geometry[2]

포함하는 유한한 탄성체에 접촉하고 있다. 여기에서 압전 탐촉자 a에서 발생된 파동이 산란자의 표면 S_f 에서 산란되어 압전탐촉자 b로 전달되게 된다. 여기에서 오직 하나의 전기원(electrical source)만이 단축진 바깥쪽 표면 S_o 의 외부에 존재하며 탐촉자는 전자기적으로 절연되어 있다. 다시 말하면 전자기장은 탐촉자 내부와 두 개의 동축보급선(co-axial line)에만 국한되어 있다.

바깥쪽 표면 S_o 는 압전탐촉자 a, b를 포함하고 전기의 공급은 S_o 밖으로부터 이루어지는 것으로 설정하면 S_o 와 S_f 사이의 영역에서는 물체력 밀도 F 와 전류 밀도 J_s 가 없으므로 식 (2)가 성립된다. 따라서 S_o 와 S_f 로 둘러싸인 공간 V 에 대해 식 (2)를 적분하면

$$\int_V (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) dV = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

이 된다.

Gauss 이론을 적용하여 부피 적분을 면 적분으로 변환하면

$$\int_{S_o+S_f} (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기에서 \mathbf{n} 은 V 에서 밖으로 향한 법선 벡터이다.

파동이 전달되는 매질은 압전 물질이 아니고 전자기장은 동축보급선 안에만 국한되어 있으므로 이 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{co-ax a} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n} dS + \int_{co-ax b} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 \\ & - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n} dS \\ & = - \int_{S_f} (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1) \cdot \mathbf{n} dS \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

아래첨자 1로 표시되는 양들은 산란자(scatterer)가 없는 매질에 동축보급선 a로 P의 에너지가 보급되어 발생하는 파동장을 나타내고, 아래첨자 2로 표시되는 양들은 산란자(scatterer)가 있는 매질에 동축보급선 b로 P의 에너지가 보급되어 발생하는 파동장을 나타낸다고 하자. co-ax a는 동축보급선 a가 표면 S_o 에 의해 잘리는 단면을 표시하고, co-ax b는 동축보급선 b가 표면 S_o 에 의해 잘리는 단면을 표시한다. 동축보급선

a, b의 끝 단자면들은 탐촉자 단면에서 발생하는 여러 고차의 waveguide 모드가 무시할 정도의 크기로 감쇠할 수 있도록 탐촉자 면에서 충분히 떨어져 있는 것으로 가정한다. 따라서 식 (5)에서 동축보급선들의 단면에서의 적분은 waveguide 모드가 없이 기본적 모드만을 포함한다. 따라서 동축보급선에서의 전자기장은, 발신 탐촉자를 가진시키는 입사 전자기장($\mathbf{E}^+, \mathbf{H}^+$)과 물체에서 반사된 파동이 탐촉자에서 다시 전자기장으로 바뀐 반사된 전자기장($\Gamma_{aa}\mathbf{E}^+, \Gamma_{aa}\mathbf{H}^+$)의 합으로 되므로, 식 (5)의 co-ax a와 co-ax b 단면에 나타나는 전자기장은 다음과 같이 쓸 수 있다.

먼저 산란자가 없는 경우(case 1)에는

$$\begin{aligned} \text{co-ax a :} \\ \mathbf{E}_1 &= (1 + \Gamma_{aa})\mathbf{E}^+, \quad \mathbf{H}_1 = (1 - \Gamma_{aa})\mathbf{H}^+ \\ \text{co-ax b :} \\ \mathbf{E}_1 &= \Gamma_{ba}\mathbf{E}^+, \quad \mathbf{H}_1 = -\Gamma_{ba}\mathbf{H}^+ \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

여기에서 Γ_{aa} 와 Γ_{ba} 는 Fig. 1에서 산란자가 없을 때의 전자기장의 반사계수와 투과계수이고 \mathbf{E}^+ 와 \mathbf{H}^+ 는 파워(power) P를 가지고 탐촉자로 전달되는 기본적 모드의 전기장과 자기장을 나타낸다. 파워 조건에서

$$\int_{co-axial line} \mathbf{E}^+ \times \mathbf{H}^+ \cdot \mathbf{n} dS = -2P \quad \dots\dots\dots (7)$$

이 성립한다.

유사하게 산란자가 있는 경우를 살펴보면(case 2)

$$\begin{aligned} \text{co-ax a :} \\ \mathbf{E}_2 &= \Gamma'_{ab}\mathbf{E}^+, \quad \mathbf{H}_2 = -\Gamma'_{ab}\mathbf{H}^+ \\ \text{co-ax b :} \\ \mathbf{E}_2 &= (1 + \Gamma'_{bb})\mathbf{E}^+, \quad \mathbf{H}_2 = (1 - \Gamma'_{bb})\mathbf{H}^+ \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

여기에서 Γ'_{bb} 와 Γ'_{ab} 는 산란자가 있을 때의 전자기장의 반사계수와 투과계수이다.

식 (6)과 (8)을 식 (5)에 대입하고 식 (7)의 관계를 사용하면 다음의 식이 된다.

$$-4P(\Gamma'_{ba} - \Gamma_{ab}) = - \int_S (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1) \cdot \mathbf{n} dS \quad \dots\dots\dots (9)$$

전기-기계 시스템에서 두 개의 탐촉자 a, b 만이 있는 경우 상호호환식이 성립하므로 $\Gamma_{ab} = \Gamma_{ba}$ 이 된다. 따라서 식 (9)는

$$\begin{aligned} \delta\Gamma_{ab} &= (\Gamma'_{ba} - \Gamma_{ba}) \\ &= \frac{1}{4P} \int_S (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1) \cdot \mathbf{n} \, dS \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

여기에서 \mathbf{n} 은 Fig. 1의 산란자를 둘러싼 표면 S_p 에서 산란자를 향한 법선 벡터이다.

그런데 단자가 하나뿐일 경우, 즉 하나의 탐촉자만 사용하는 경우에는 식 (10)에서 b 를 a 로 바꾸고 아래 첨자 1로 표시되는 양들은 산란자(scatterer)가 없는 매질에 동축보급선 a 로 발생시킨 파동장을 나타내고, 아래첨자 2로 표시되는 양들은 산란자(scatterer)가 있는 매질에 똑같은 동축보급선 a 로 발생시킨 파동장을 나타낸다고 보면, 식 (10)이 그대로 성립된다. 즉

$$\begin{aligned} \delta\Gamma_{aa} &= (\Gamma'_{aa} - \Gamma_{aa}) \\ &= \frac{1}{4P} \int_S (\mathbf{v}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - \mathbf{v}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1) \cdot \mathbf{n} \, dS \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

이 경우 $\delta\Gamma_{aa}$ 는 단자 a 에서 산란자가 있을 때와 없을 때의 반사 계수의 차이를 나타내게 된다. 즉 산란자에 의한 전자기장의 반사 계수의 변화를 나타낸다. 펄스-반향(pulse echo) 실험에서 $\delta\Gamma_{aa}$ 는 탐촉자에서 관찰할 수 있는 산란자에서의 반사되어 오는 파동 신호와 비례한다. 산란자에 의한 반사 계수 변화는 산란자의 모양 및 특성에 따라서 크기가 변화한다.

3. 초음파 현미경에서 탐촉자 신호의 계산

초음파 현미경은 수 마이크로 미터(메가헤르츠의 주 파수에서)의 미소 국부에서의 Rayleigh 파동속도를 구할 수 있는데, 초음파 현미경을 시편 표면에서 이동 하면서 측정하면 미소 국부에서 시편 파동속도의 변화를 측정할 수 있다. 초음파 현미경의 초점을 시편 표면 보다 아래쪽으로 이동해 가면서 탐촉자의 전기신호를 측정한 신호를 음장 물질 신호(acoustic material signature)라고 하는데, 이 신호로부터 Rayleigh 파동속도를 구할 수 있다. 여기에서는 음장 물질 신호를 구하고자 한다.

Fig. 2는 초음파 현미경의 렌즈를 보여주고 Fig. 3은 초음파 현미경 렌즈의 해석 모델을 보여준다. 초음파 현미경에서는 탐촉자에서 발생한 tone-burst가 초음파 렌즈(buffer rod와 coupling fluid)를 통해 집

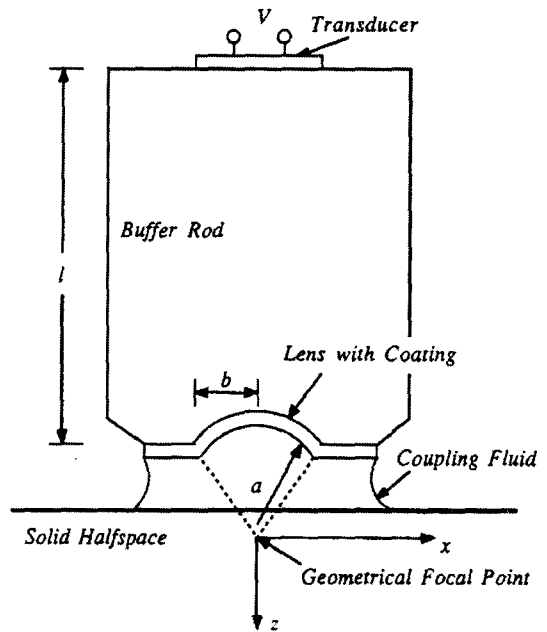


Fig. 2 The lens of the scanning acoustic microscope showing its principal features (3)

중되어 시험편을 가진하게 된다. 이 집적된 파동이 물체에서 반사되어 다시 초음파 렌즈를 거쳐 탐촉자에 도달하여 전기적 신호를 발생시키게 된다.

초음파 현미경의 전기적 신호를 구하기 위해서는 Fig. 3의 시편 표면 S_p 에 입사하는 파동의 변위와 트랙션, 그리고 S_p 에서 반사하는 파동의 변위와 트랙션을 알아야 한다. 입사파동과 반사파동의 S_p 에서의 변위와 트랙션은 경계요소법을 사용하여 구할 수 있다[3].

탐촉자에서 발생한 파동은 Gaussian 형태의 beam으로 가정한다. Gaussian beam이 Fig. 2의 buffer rod를 통하여 coupling fluid에서 굴절하게 된다. 유체와 buffer rod에 경계요소법을 적용하고 유체와 buffer rod 경계면의 경계조건을 사용하여 풀면 입사하는 파동을 구할 수 있다. 입사하는 파동이 시편 표면 S_p 에서 leaky Rayleigh 표면파와 압축파 형태로 반사하게 되는데, 이것을 유체와 시편의 경계 조건과 경계요소법을 사용하여 계산하면 반사하는 파동을 알 수 있게 된다[3]. 여기에서는 [3]에서 계산된 입사파와 반사파의 변위와 트랙션 값을 사용한다.

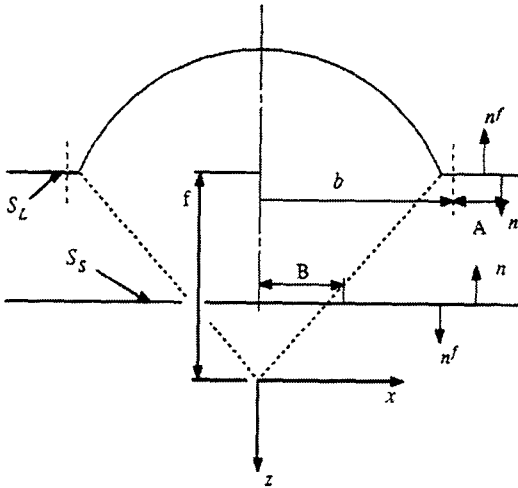


Fig. 3 A schematic diagram of the model of the microscope's lens(3)

시편에 의한 탐촉자 단자의 전기신호는 시편을 포함하는 입의 단한 표면을 적분하여 구할 수 있다. Fig. 3에서 시편의 표면 S_s 를 적분면으로 선택하는 것이 가장 편리하다. [3]에서는 S_s 에서 입사파 및 반사파의 변위, 트랙션을 구했는데, 식 (11)은 속도의 항들로 표현되어 있으므로 속도와 변위의 관계가 필요하다. 시간 조화 운동에서 속도와 변위는 다음의 관계를 가진다.

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u \dots\dots\dots (12)$$

식 (11)에 식 (12)를 대입하면

$$\delta\Gamma_{\omega} = \frac{i\omega}{4P} \int_S (u_1 \cdot \sigma_2 - u_2 \cdot \sigma_1) \cdot n \, dS \dots\dots\dots (13)$$

이 된다. 아래첨자 1은 입사하는 파동을 표시하고 아래첨자 2는 산란된 파동을 나타낸다. 식 (13)을 적정한 상수 C를 사용하여 탐촉자에서의 신호 크기를 구하면

$$\begin{aligned} V &= C \int_S (u_1 \cdot \sigma_2 - u_2 \cdot \sigma_1) \cdot n \, dS \\ &= C \int_S (u_1 \cdot t_2 - u_2 \cdot t_1) \, dS \\ &= C \int_S (u_1^{in} t_1^{sc} - t_1^{in} u_1^{sc}) \, dS \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

여기에서 t_1, t_2 는 산란자 표면에서의 트랙션을 표시하

고 세 번째 적분에서 윗첨자 in은 입사하는 파동을 sc는 산란된 파동을 표시한다. 여기에서 첫 번째와 두 번째의 적분에서 아래 첨자 1은 입사하는 파동이므로 세 번째 적분의 윗첨자 in과 같은 의미이고 또 첫 번째와 두 번째의 적분에서 아래 첨자 2는 세 번째 적분의 산란된 파동을 표시하는 sc와 같은 의미를 갖는다.

산란자에 의한 탐촉자 신호의 변화는 식 (14)를 적용하여 구할 수 있다. 산란자에 의한 탐촉자의 신호는 산란자 주위의 단한 표면에 탐촉자에서 발생하여 입사하는 파동의 변위 및 응력과 산란자에서 산란된 파동의 변위 및 응력을 식 (14)에 대입하여 구할 수 있다.

초음파 현미경에서 시편에 입사하는 파동은 한 점에 집중되므로 여러 파동이 다른 각도로 입사하게 된다. 집적된 파동이 시험편의 표면에서 일부는 반사 및 투과되며, 이 중 임계각도로 입사하는 파동은 leaky Rayleigh 표면파로 변환되어 경계표면을 따라 전파된다[4]. 후자는 초음파 현미경에서 매우 중요하며 유체 내부로 압축파동을 발산하며 진행하므로 짧은 영역에서 소멸된다. 반사된 압축 파동과 leaky Rayleigh 표면파가 유체 내부로 발산하는 파동과는 진행거리의 차이로 phase 각도의 차이가 발생하는데, 이 phase 각도 차이에 따라 음장 물질 신호 크기가 주기성을 보이게 된다. 즉 초음파 현미경의 음장 물질 신호는 두 파동이 같은 phase 각도에서 크게 되고 반대 phase에서 작게 된다. 시편 leaky Rayleigh 표면파 속도에 따라서 이 주기가 결정된다[5]. 식 (14)에서의 적분 영역인 시험편의 전체 단한 표면 S_f 중 Fig. 3의 입사파가 집중되는 매우 미소한 영역 밖에서는 입사하는 파동의 u_i^{in}, t_i^{in} 과 산란된 파동의 u_i^{sc}, t_i^{sc} 이 실제적으로 0이 되고, 식 (14)의 적분항이 0이 된다. 따라서 식 (14)의 적분은 다음 식과 같이 줄어들게 된다.

$$\begin{aligned} V &= C \int_{S_f} (u_i^{in} t_i^{sc} - t_i^{in} u_i^{sc}) \, dS \\ &= C \int_{S_f} (u_i^{in} t_i^{sc} - t_i^{in} u_i^{sc}) \, dS \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

식 (15)를 적용하여 fused quartz의 음장 물질 신호(acoustic material signature)를 구한 것이 Fig. 4에 나타나 있다. 초음파 현미경 초점과 시험편의 거리 z를 변화시켜 가며 탐촉자의 신호를 구한 것이다. 탐촉자 신호 크기를 최고값으로 나는 값을 세로축으로 하고 초음파 현미경의 초점과 시험편의 거리를 유체(물)의

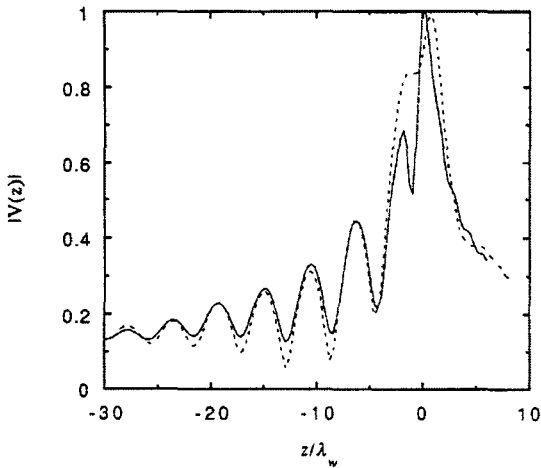


Fig. 4 Magnitude of $V(z)$ as a function of z/λ_w for fused quartz. Solid calculation and dashes experimental result(3)

파장으로 나눈 값을 가로축으로 표시하였다. 그림에서 점선으로 나타낸 것은 실제의 실험 결과이고 실선은 계산된 결과를 보여준다. 여기에서 사용된 초음파 현미경은 225 MHz에서 작동하였고 fused quartz의 밀도는 $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 종파속도와 횡파속도는 각각 $5.9 \times 10^3 \text{ m/s}$, $3.7 \times 10^3 \text{ m/s}$ 이다.

4. 결 론

본 논문에서는 파동 해석에서 구한 산란된 파동 변위, 응력으로부터 탐촉자 전기 신호를 구하는 방법을 다루었으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 경계요소법을 사용하여 구한 산란된 파동 결과를 탐촉자의 전기 신호로 변환하는 것이 가능하다.
2. 산란자에서 산란된 파동의 전기적 신호는 시편을 포함하는 임의의 닫힌 표면의 적분식 (14)를 사용하여 구할 수 있다.
3. 파동 이론 해석 결과를 탐촉자 전기 신호로 변환하므로써 직접 실험 결과와 비교가 가능하며, Fig. 4에서 계산 결과가 실험결과와 매우 잘 맞는 것을 보여 주고 있다.

참고문헌

- [1] H. Primakoff and L. L. Foldy, "A general theory of passive linear electroacoustic transducers and the electroacoustic reciprocity Theorem II", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 19, pp. 50-58, (1947)
- [2] B. A. Auld, "General Electromechanical Reciprocity Relations Applied to the Calculation of Elastic Wave Scattering Coefficients", Wave Motion, Vol. 1, pp. 3-10, (1979)
- [3] J. D. Achenbach, T. W. Ahn, J. G. Harris, "Wave analysis of the acoustic material signature for the line focus microscope", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 38, No. 4, pp. 380-387, (1991)
- [4] J. D. Achenbach, Wave Propagation in Elastic Solids, North-Holland, Amsterdam, (1987)
- [5] A. Briggs, An Introduction to Scanning Acoustic Microscopy, Oxford, New York, (1985)