

## 금속 박막의 유도초음파 분산 특성 연구

### Investigation on Guided Wave Dispersion Characteristics for Metal Thin Films

김미소\*, 조승현\*<sup>†</sup>, 장강원\*\*, 이승석\*, 박익근\*\*\*

Miso Kim\*, Seung Hyun Cho\*<sup>†</sup>, Gang-Won Jang\*\*, Seung-Seok Lee\* and Ik-Keun Park\*\*\*

**초 록** 나노/마이크로 소자의 개발이 활발해짐에 따라 나노/마이크로 박막의 기계적 물성의 정밀 측정에 대한 필요성이 점차 커지고 있다. 기존의 파괴적인 방법의 한계를 극복하기 위한 방법으로, 유도초음파를 이용한 비파괴적인 박막 물성 방법에 대한 관심이 늘어나고 있다. 유도초음파를 이용하여 박막의 물성을 측정하는 실험을 설계하거나, 물성 측정에 대한 실험 결과를 이해하는데 있어 박막의 분산선도를 이해하는 것은 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는, 전달 행렬법을 이용하여 박막의 분산선도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 금속 박막에 적용하여 그 특성을 관찰하였다. 전달 행렬법을 이용하여 다층판에서의 주파수에 따라 유도초음파가 전파하는 속도를 계산하여 상용 프로그램과 비교하여 그 타당성을 확인하였다. 이러한 방법을 Si 기판 위에 증착된 Al 금속 박막에 적용하여 얻은 분산곡선의 분석을 통해, 박막의 두께 조건에 따른 모드와 분산 및 비분산 특성이 나타나는 구간을 관찰할 수 있었다.

**주요용어:** 유도초음파, 금속 박막, 분산 특성, 전달 행렬

**Abstract** In this study, we investigated the dispersion characteristics of guided waves in thin films. Dispersion curves are essential for understanding not only the behavior of ultrasonic waves, but also the mechanical properties of thin films. Matrix techniques are presented for modeling ultrasonic waves in multilayered structures before being used to calculate the dispersion curves for Al-steel and Al-composite specimens. When compared with the dispersion curves obtained using the commercial program (Disperse), the dispersion curves generated from the transfer matrix method show its validity. These developed methods are used to obtain dispersion curves for Al thin films deposited on a Si substrate. The resulting dispersion curves enable observation of both dispersive and non-dispersive behavior for the guided waves, depending on the thickness of the thin films.

**Keywords:** Guided Wave, Ultrasonics, Thin Films, Dispersion, Transfer Matrix

#### 1. 서 론

나노/마이크로 기술은 바이오, 화학, 에너지, 반도체 산업 등 다양한 산업 분야에 걸쳐 적용되고 있다. 나노/마이크로 박막에 대한 물성의 정밀 측정은 반도체를 비롯한 첨단 소자의 설계 및 안정적인 구동을 위해 필수적이다. 반도체 및 에너지 소자(예, 태양 전지, 유연 트랜지스터 및 디스플레이)는 단일 박막 및 다층 박막으로 이루어져

있고, 그 특성이 bulk일 때와 다르다. 따라서 기존의 bulk 물성 측정 방법과는 다른 측정 및 분석 방법이 요구되며, 이러한 물성은 소자의 성능을 예측하고 디자인하는 것에 있어서도 직접적인 영향을 준다. 이러한 나노/마이크로 구조물에서의 소재 특성을 정밀하게 측정하고 평가하는 것은 정밀한 소재 설계를 가능하게 함으로써 현재 소자 성능의 한계점을 극복하고 성능 향상에 기여함으로써 경제적 비용을 절감하게 할 뿐 아니라

[접수일: 2014. 3. 31, 수정일: 2014. 5. 21, 게재확정일: 2014. 5. 27] \*한국표준과학연구원 안전측정센터, \*\*세종대학교 기계항공우주공학부 \*\*\*서울과학기술대학교, <sup>†</sup>Corresponding Author: Korea Research Institute of Standards and Science, Center for Safety Measurement, Daejeon 305-340, Korea (E-mail: seungcho@kriss.re.kr)

나노/마이크로 산업 분야에서 경제적, 산업적으로 큰 파급효과와 함께 막대한 수익을 창출하게 할 수 있다.

박막의 기계적 물성을 평가하는 방법으로 원자 힘현미경(atomic force microscopy, AFM), 전자주사현미경(scanning electron microscope, SEM), 나노압입(nanoindentation) 등의 방법이 있다. 이러한 평가 방법들은 널리 사용되고 있는 방법이지만, 측정을 위해 시편을 가공해야 하거나 시편 표면 또는 내부에 손상을 주는 것이 불가피하다. 비파괴적으로 박막의 기계적 물성을 측정하는 방법으로 유도초음파를 이용하는 방법이 있다. 유도초음파는 구조물의 경계를 따라 진행하는 파동에너지로써, 소재의 종류와 두께 등 물성과 형상에 따라 고유의 분산 특성이 달라진다. 따라서 박막에서의 유도초음파의 분산 특성을 이용하여, 시편의 표면이나 내부에 손상을 주지 않는 기계적인 물성 평가가 가능하다[1].

유도초음파를 이용하여 비파괴적인 방법으로 박막의 물성을 측정하는 방법은 주로 단층판에 국한되어져 왔다[2-4]. 압전 센서, 레이저 기반 초음파(laser-based ultrasonics), 또는 EMAT(electromagnetic acoustic transducer) 등을 이용하여 유도초음파를 발생시켜 이를 물성 측정에 응용한 사례가 보고되고 있다. Hernandez 등[5]은 레이저 펄스에 의한 빠른 열팽창을 이용하여 비파괴적인 방법으로 500 nm의 판의 물성을 추정하는 연구를 발표하였다. 수백 나노미터급 박판의 경우에는 수백 MHz 주파수 대에 S0 모드와 A0 모드만이 존재하는데 보통의 광분산 기술은 A0 모드만의 가진과 측정을 할 수 있다. Hernandez et al.의 광간섭 시스템은 두 가지 모드 모두를 가진/측정할 수 있어 탄성계수, 전단탄성계수뿐 아니라 잔류응력의 추정이 가능하다고 논문에서 보고 하였다. 최근에 Wei et al. [6]은 PVDF 선초점 트랜스듀서를 이용하여 Lamb 유도초음파를 가진/측정하고 분산곡선을 구하여 평판의 물성을 추정하는 연구를 수행하였다. 이들은 스테인레스판과 유리판에 멀티모드로 유도초음파를 보내고 받으며 이 신호들을 수정된  $V(f, z)$  이미지 프로세싱을 통하여 분산곡선을 정확히 계산하였다. 또한 실험에서 얻은 분산곡선을 이론값들과 비교하는 과정에서 최적화를 적용하여 물성추정에 소요되는 시간 비용을 줄이는 것을 제안하였다.

다층판에서의 파동의 전파에 관한 연구는 주로 지진 연구에서 비롯되었는데 다층의 암반으로 구성된 지형의 표면에 지진파가 전파되는 양상을 연구하는 데에 주된 관심이 있었다. Thomson[7]은 최상위 경계의 변위와 응력을 최하위 경계의 변위와 응력과 연관시키는 전달행렬을 도입하여 다층판을 구성하는 층의 개수에 관계없이 유한한 크기의 작은 행렬로 이들의 관계를 간단히 나타내었다. 최상층과 최하층의 경계에 적절한 경계조건을 부여하고 전달행렬의 모달 해를 구하면 특성방정식을 이끌어 낼 수 있었다. Thomson의 연구는 Haskell[8]에 의해 보완되었고 디지털 컴퓨터의 발전과 더불어 급속히 발전하게 되었다. 따라서 전달행렬법은 Thomson-Haskell 방법이라고도 일컫는다.

유도초음파를 이용한 박막의 물성 측정 실험 또는 관련 연구를 위해서는, 박막의 분산선도를 이해하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 Thomson-Haskell의 전달행렬법[9] (Lowe, 1995)을 이용하여 다층 박막의 분산 곡선을 계산하는 방법을 제시하고, 이를 실제 다층 시편에 적용하여 기존 프로그램과 비교, 분석함으로써 그 실효성을 검증하였다.

## 2. 다층박막 분산곡선

삼차원 무한 탄성체에서의 파동 지배방정식을 벡터 형식으로 나타내면 다음과 같다[10].

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u = 0 \quad (1)$$

위에서  $u$ 는 각각  $x_1, x_2, x_3$  방향으로의 변위이며(Fig. 1 참고),  $\lambda, \mu$ 는 재료의 라메 상수,  $\rho$ 는 재료의 밀도이다. 식(1)의 해는 Helmholtz 법[11]을 이용하여 스칼라 함수  $\phi$ 와 벡터 함수  $\psi$ 를 이용하여 종파(L)와 횡파(S)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$u_L = \nabla \phi, \text{ and } u_s = \nabla \times \psi \quad (2a)$$

이고

$$\phi = A_L e^{j(k \cdot x - \omega t)} = A_L e^{j(k_1 x_1 + k_2 x_2 - \omega t)} \quad (2b)$$

$$\psi = A_S e^{j(k \cdot x - \omega t)} = A_S e^{j(k_1 x_1 + k_2 x_2 - \omega t)} \quad (2c)$$

이다. 위에서  $x_1$ 은 판의 길이 방향으로의 좌표이고  $x_2$ 는 두께 방향 좌표이다. 본 연구에서는 전단횡파(shear horizontal wave)를 고려하지 않기 때문에  $x_3$  방향으로의 변위는 무시하였다. 식(2a)을 식(1)에 대입하면 다음과 같은 종파와 횡파의 파동방정식을 얻는다.

$$\rho \frac{\partial^2 u_L}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 u_L = 0 \tag{3a}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_S}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 u_S = 0 \tag{3b}$$

따라서 종파와 횡파의 체적파의 속도는 다음과 같다.

$$c_L = \frac{\omega}{|k|} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \alpha \tag{4a}$$

$$c_S = \frac{\omega}{|k|} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \beta \tag{4b}$$

위에서  $E$ ,  $G$ 는 탄성계수, 전단탄성계수이다. 식(2)에서

$$u_L = \nabla \phi = \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ 0 \end{Bmatrix} A_L e^{j(k \cdot x - \omega t)} \tag{5a}$$

$$u_S = \nabla \times \psi = \begin{Bmatrix} k_2 \\ -k_1 \\ 0 \end{Bmatrix} A_S e^{j(k \cdot x - \omega t)} \tag{5b}$$

이다. 식(5b)에서  $x_3$  방향의 변위를 고려하지 않기 때문에  $\psi = \{0, 0, \psi_3\}^T = \{0, 0, A_S e^{j(k \cdot x - \omega t)}\}^T$ 로 표현하였다.

Snell의 법칙에 의거하여 다층판에서 파동이 전파할 때 매 층에서의 파동은 주파수와 판의 길이 방향( $x_1$  방향)으로의 파장이 동일하다. 즉 모든 층에서의 변위식과 응력식은 같은  $\omega$ 와  $k_1$ 으로 표현된다. 이 때  $k_1$ 은 체적파 파수의 층 경계면으로의 투영이므로 모든 층에서의 파동이 같은  $k_1$ 을 가져야한다는 것은 명확하다. 따라서 모든 층의 파동은 아래와 같은 공통 인자를 지닌다.

$$F = e^{j(k_1 x_1 - \omega t)} \tag{6}$$

한편 위에서 계산된 종파속도  $\alpha$ 와 횡파속도  $\beta$ 를 이용하여 두께 방향의 파수를 다음과 같이 나타

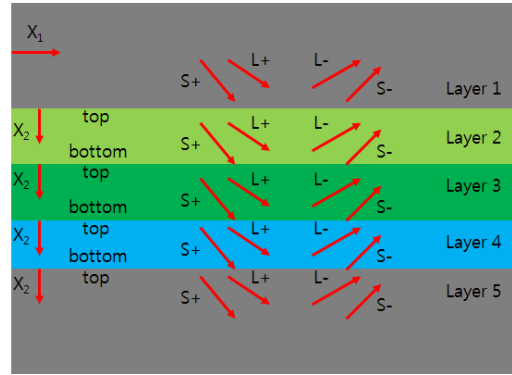


Fig. 1 Schematic of a multi-layer structure where relevant axes and directions of longitudinal and transverse waves are indicated

낼 수 있다.

$$k_{2L\pm} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{\alpha^2} - k_1^2} \tag{7a}$$

$$k_{2S\pm} = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{\beta^2} - k_1^2} \tag{7b}$$

Fig. 1에서  $x_2$ 의 양의 방향이 판의 아래방향으로 향하고 있으므로 위 식에서 +는 판의 아래방향으로 진행되는 파동을 나타내고 -는 판의 윗방향으로 진행되는 파동을 나타낸다.

식(5)-(7)을 이용하여 변위를 나타내면

$$\begin{aligned} u &= u_L + u_S \tag{8} \\ &= \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_{2L} \\ 0 \end{Bmatrix} A_L e^{j(k \cdot x - \omega t)} + \begin{Bmatrix} k_{2S} \\ -k_1 \\ 0 \end{Bmatrix} A_S e^{j(k \cdot x - \omega t)} \\ &= \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_{2L-} \\ 0 \end{Bmatrix} A_{L-} e^{j(k_{2L-} x_2)} F + \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_{2L+} \\ 0 \end{Bmatrix} A_{L+} e^{j(k_{2L+} x_2)} F \\ &\quad + \begin{Bmatrix} k_{2S-} \\ -k_1 \\ 0 \end{Bmatrix} A_{S-} e^{j(k_{2S-} x_2)} F + \begin{Bmatrix} k_{2S+} \\ -k_1 \\ 0 \end{Bmatrix} A_{S+} e^{j(k_{2S+} x_2)} F \end{aligned}$$

이다. 위에서 변위는 4개의 파동의 합으로 표현할 수 있음에 주목할 필요가 있다. 이는 Fig. 1과 같이 임의의 층에서의 파동은 2개의 종파와 2개의 횡파로 구성된다는 것을 의미한다.

위의 식을 이용하여 종파와 전단 체적파에 의한 변위식과 응력식을 얻을 수 있으며 이들을 행렬 형태로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 g_\alpha & \frac{k_1}{g_\alpha} & C_\beta g_\beta & \frac{-C_\beta}{g_\beta} \\ C_\alpha g_\alpha & \frac{-C_\alpha}{g_\alpha} & -k_1 g_\beta & \frac{-k_1}{g_\beta} \\ j\rho B g_\alpha & \frac{j\rho B}{g_\alpha} & -2j\rho k_1 \beta^2 C_\beta g_\beta & \frac{2j\rho k_1 \beta^2 C_\beta}{g_\beta} \\ 2j\rho k_1 \beta^2 C_\alpha g_\alpha & \frac{-2j\rho k_1 \beta^2 C_\alpha}{g_\alpha} & j\rho B g_\beta & \frac{j\rho B}{g_\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{pmatrix} \quad (9a)$$

위의 식에서  $C_\alpha$ ,  $C_\beta$ ,  $g_\alpha$ ,  $g_\beta$ ,  $B$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$C_\alpha = (\omega^2/\alpha^2 - k_1^2)^{1/2} \quad (9b)$$

$$C_\beta = (\omega^2/\beta^2 - k_1^2)^{1/2} \quad (9c)$$

$$g_\alpha = e^{i(\omega^2/\alpha^2 - k_1^2)^{1/2} x_2} \quad (9d)$$

$$g_\beta = e^{i(\omega^2/\beta^2 - k_1^2)^{1/2} x_2} \quad (9e)$$

$$B = \omega^2 - 2\beta^2 k_1^2 \quad (9f)$$

식(9a)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{pmatrix} \quad (10)$$

위의 행렬  $D = D(w, k_1, k_2, \rho, \alpha, \beta)$ 이다. Fig. 1과 같이 좌표축과 층의 인덱스를 설정하였을 경우 Layer 2의 위 경계층에 작용하는 변위, 응력은 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_2, \text{top}} = D_{l_2, \text{top}} \begin{pmatrix} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{pmatrix}_{l_2} \quad (11)$$

or

$$\begin{pmatrix} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{pmatrix}_{l_2} = D_{l_2, \text{top}}^{-1} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_2, \text{top}}$$

Layer 2의 아래 경계층의 변위, 응력은

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_2, \text{btm}} = D_{l_2, \text{btm}} \begin{pmatrix} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{pmatrix}_{l_2} \quad (12)$$

$$= D_{l_2, \text{btm}} D_{l_2, \top}^{-1} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_2, \top} = L_{l_2} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_2, \top}$$

과 같이 표현된다. 위 식에서  $L_{l_2}$ 는 Layer 2의 상층 경계의 변위, 응력과 하층 경계의 변위, 응력 사이의 관계를 나타내는 전달행렬(transfer matrix)로서 각 원소들을 다음과 같이 주어진다.

$$L_{11} = \frac{\beta^2 k_1^2}{w^2} \left( g_\alpha + \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{B}{2w^2} \left( g_\beta + \frac{1}{g_\beta} \right) \quad (13)$$

$$L_{12} = \frac{k_1 B}{2w^2 C_\alpha} \left( g_\alpha - \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{k_1 \beta^2 C_\beta}{w^2} \left( -g_\beta + \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{13} = \frac{k_1}{2jw^2 \rho} \left( g_\alpha + \frac{1}{g_\alpha} - g_\beta - \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{14} = \frac{k_1^2}{2jw^2 \rho C_\alpha} \left( g_\alpha - \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{C_\beta}{2jw^2 \rho} \left( g_\beta - \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{21} = \frac{C_\alpha \beta^2 k_1}{w^2} \left( g_\alpha - \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{B k_1}{2w^2 C_\beta} \left( -g_\beta + \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{22} = \frac{B}{2w^2} \left( g_\alpha + \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{\beta^2 k_1^2}{w^2} \left( g_\beta + \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{23} = \frac{C_\alpha}{2jw^2 \rho} \left( g_\alpha - \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{k_1^2}{2jw^2 \rho C_\beta} \left( g_\beta - \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{24} = L_{13}$$

$$L_{31} = \frac{j\rho B \beta^2 k_1}{w^2} \left( g_\alpha + \frac{1}{g_\alpha} - g_\beta - \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{32} = \frac{j\rho B^2}{2w^2 C_\alpha} \left( g_\alpha - \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{2j\rho \beta^4 k_1^2 C_\beta}{w^2} \left( g_\beta - \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{33} = L_{22}$$

$$L_{34} = L_{12}$$

$$L_{41} = \frac{2j\rho B^4 k_1^2 C_\alpha}{w^2} \left( g_\alpha - \frac{1}{g_\alpha} \right) + \frac{j\rho B^2}{2w^2 C_\beta} \left( g_\beta - \frac{1}{g_\beta} \right)$$

$$L_{42} = L_{31}$$

$$L_{43} = L_{21}$$

$$L_{44} = L_{11}$$

이를 일반화하면 Layer n-1의 하층 경계 (또는 Layer n에서의 상층 경계)에서의 응력, 변위는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_n, \text{top}} = S \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}_{l_2, \text{top}} \quad (14)$$

여기에서 최종 전달행렬  $S$ 는 다음과 같다.

$$S = L_{l(n-1)}L_{l(n-2)} \cdots L_{l3}L_{l2} \quad (15)$$

주어진 다층판이 진공상태에 놓여 있다면 다층판의 맨 위 경계와 맨 아래 경계는 응력이 작용하지 않는 상태이므로 식(15)의 전달행렬을 이용한 응력 변위의 식은 다음과 같이 주어질 것이다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{l_{n,top}} = S \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{l_{2,top}} \quad (16)$$

따라서  $S$  행렬의 부분 행렬만을 생각하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{l_{n,top}} = \begin{bmatrix} S_{31} & S_{32} \\ S_{41} & S_{42} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}_{l_{2,top}} \quad (17)$$

따라서 위의 식의 행렬식(determinant)는 0이 되어야 하고 이는 다음과 같은 특성방정식으로 주어진다.

$$f(w, k_1) = S_{31}S_{42} - S_{41}S_{32} = 0 \quad (18)$$

관심 주파수 구간에 대하여 어느 주어진 주파수에 해당하는 파수를 구하기 위하여 식(18)의 해를 구하면 분산곡선을 얻을 수 있다. 단순히 분산곡선을 그리는 것이 목적이라면 주파수와 파수를 관심구간에 대하여 이산화한 후 주어진 주파수, 파수(혹은 위상속도)에 대하여 식(18)을 계산하여 행렬 형태로 이를 나타낸다.

### 3. 계산 적용 및 분석

#### 3.1. 다층판 분산곡선 계산 및 검토

앞 절에서 제시한 전달행렬법을 이용하여 Al-steel과 Al composite 두 다층판 시편에 대하여 분산곡선을 계산, 분석하였다. 각 시편을 구성하고 있는 소재의 물성(밀도, 종파와 횡파 속도)과 두께 정보는 Table 1에 제시하였다.

우선, Al-steel 시편에 대하여 식(18)을 이용하여 모든 이산화된 주파수, 위상속도에 대하여 계산하여 표시한 결과는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

분산곡선은 Fig. 2의 결과 중  $f=0$ 에 해당하는 등고선(contour)을 그리면 된다[12]. Fig. 3과 Fig. 4

Table 1 Geometric dimensions and material properties of each specimen

Structure	Material	thickness [mm]	density [kg/m <sup>3</sup> ]	longitudinal bulk wave speed [m/sec]	shear bulk wave speed [m/sec]
Al-steel	Al	0.4	2700	6320	3130
	steel	1.2	7800	5900	3190
Al-composite	Al	0.3	2770	6320	3150
	epoxy	0.25	2500	3150	1720

Table 2 Material properties of Al and Si used for simulation

Material	Si	Al
density [kg/m <sup>3</sup> ]	2329	2375
Young's modulus [GPa]	130	70
Poisson's ratio	0.28	0.35

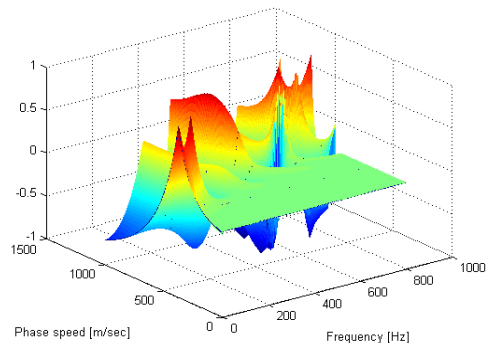


Fig. 2 Distribution of characteristics function,  $f$ , in equation (19) for Al-steel specimen. Dispersion curve is the contour plot when  $f = 0$ , which is shown in Fig. 3.

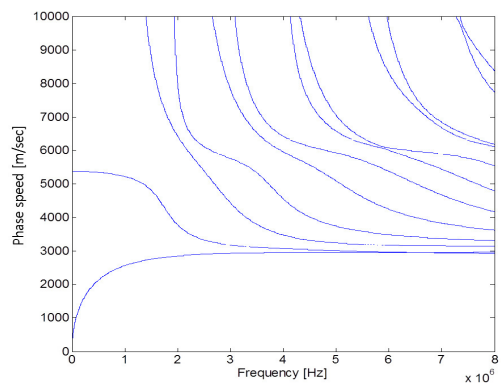


Fig. 3 Dispersion curve for Al-steel using matrix transfer method

에 이 방법에 의해서 Al-steel과 composite 시편에 대하여 구한 분산곡선을 각각 표시하였다.

계산한 분산곡선의 정확성을 검증하기 위하여 상용프로그램 Disperse에서 구한 분산곡선과 비교하였다. Fig. 5와 Fig. 6는 각각 Disperse를 사용하여 구한 Al-steel과 Al composite의 분산곡선이다. Disperse를 이용하여 구한 분산곡선(Fig. 5와 Fig. 6)과 전달행렬법을 이용하여 얻은 분산곡선(Fig. 3와 Fig. 4)을 비교해보면 결과가 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 Disperse로 얻은 분산곡선은 Al steel과 Al composite 두 경우 모두 (Fig. 5 과 Fig. 6) S0의 저주파 영역에 수치적 불안정성이 관찰된다. Al-steel의 경우, Disperse로 얻은 분산곡선(Fig. 5)은 고차 모드가 하나 빠져 있음을 관찰할 수 있었다. 이에 반하여, 전달행렬법을 사용한 경우에는 안정적으로 분산곡선을 정확하게 예측할 수 있었다.

### 3.2. 금속박막의 분산곡선 고찰

나노/마이크로 박막은 보통 Si 기판 위에 증착하여 사용하므로, 최소 2층으로 구성된 다층판으로 볼 수 있다. Lowe에 의하면 전달행렬법은 10 MHz-mm 이하의 주파수와 두께의 다층판 계산에 대하여 매우 안정된 결과를 보이는 것으로 알려져 있으므로[9], 일반적으로 나노/마이크로 스케일의 소자에 사용되는 박막의 두께를 고려할 때 전달행렬법은 박막의 분산곡선을 계산, 예측하는데 적합한 것으로 판단된다.

전달행렬법을 이용하여 실리콘 기판위에 증착된 알루미늄 박막의 분산곡선을 증착 두께(0.1  $\mu\text{m}$ , 0.4  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ )에 따라 구한 결과가 Fig. 7에 나타나있다. 실리콘 기판의 두께는 600  $\mu\text{m}$ 로 가정하였다.

각각의 분산곡선에서 주파수가 0인 경우는 알루미늄 박막의 두께가 0인 것과 동일하므로 이때의 속도는 실리콘의 속도이다. 이는 Young's modulus가 130 GPa, Poisson's ratio가 0.280, 밀도가 2329  $\text{kg/m}^3$ 일 때, 증착되는 알루미늄의 박막의 두께와 관계없이 모두 4320 m/s로 나타난다 (Fig. 7). 유의하여야 할 것은, 실제 박막 증착 시 사용되는 Si wafer의 두께와 물성에 따라 실리콘의 초음파 속도는 달라지고, 이는 증착하는 박막의 분산특성에도 영향을 미치므로, 실제 측정 시 사용하는 실리콘 기판의 특성을 고려하여 박막의

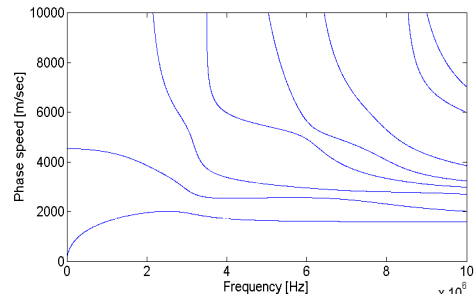


Fig. 4 Dispersion curve for Al composite using matrix transfer method

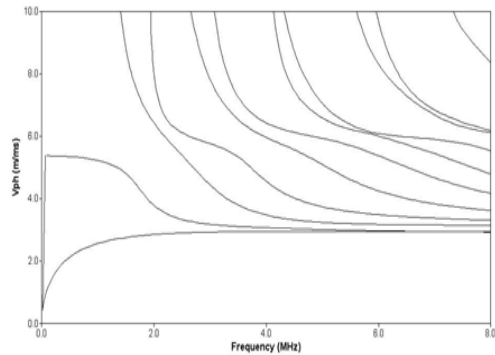


Fig. 5 Dispersion curve for Al-steel using Disperse

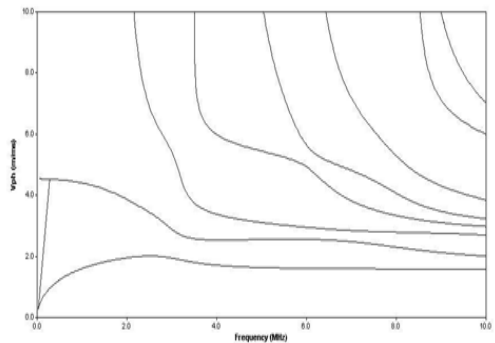


Fig. 6 Dispersion curve for Al composite using Disperse

분산선도를 예측, 분석할 필요가 있다는 것이다.

알루미늄 박막의 두께가 0.1  $\mu\text{m}$  인 경우 (Fig. 7(a)), 박막에서 전달되는 유도초음파의 속도는 주파수에 따라 감소하는 경향을 보이나, 그 정도는 크지 않다. 주파수가 1 GHz에서 9 GHz까지 증가할 때, 4260 m/s에서 4050 m/s로 감소한다.

알루미늄 박막의 두께가 증가할수록 주파수에 따른 속도의 감소 정도가 커지는 경향을 보이며, 특정 두께 이상이 될 경우 박막에서 전달되는 유도초음파는 분산 특성을 보이는 구간과 비분산 특성을 보이는 구간이 뚜렷하게 구분되기 시작한다. 두께를 0.1  $\mu\text{m}$ , 0.2  $\mu\text{m}$ , 0.4  $\mu\text{m}$ , 0.6  $\mu\text{m}$ , 0.8  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ 으로 변화시키며 관찰한 결과 비분산 (non-dispersive) 특성은 알루미늄 박막의 두께가 0.4  $\mu\text{m}$ 에서 0.6 사이에서 나타나기 시작한다.

Fig. 7(b)에 두께가 0.4  $\mu\text{m}$ 인 경우의 분산곡선을 나타내었다. 주파수가 4 GHz까지의 구간은 주파수에 따라 속도가 감소하는 것이 뚜렷하게 관찰되는 반면, 4 GHz 이상의 주파수 구간에서는 속도의 변화가 크지 않은 비분산 구간이라 볼 수 있다. 4~7 GHz 구간에서에서의 0.4  $\mu\text{m}$  두께의 알루미늄 박막의 속도는 대략 3100~3200 m/s로 예측된다. Fig. 7(c)에서 볼 수 있듯이, 1  $\mu\text{m}$  두께박막의 경우 분산특성은 대략 2 GHz까지 나타나며 그 이상의 주파수에서는 비분산적인 특성이 나타난다. 0.6  $\mu\text{m}$  두께의 경우와 마찬가지로, 비분산 특성이 나타나는 구간의 속도는 대략 3100~3200 m/s이다.

Fig. 7의 분산곡선 분석을 통해 두께에 따른 모드 관찰이 가능하다. 두께가 0.1  $\mu\text{m}$ 일 때는 1차 모드만이 관찰되었으나, 두께가 0.2  $\mu\text{m}$ 인 경우부터 주파수 8 GHz 부근의 영역에서 2차 모드가 서서히 나타나기 시작함을 관찰할 수 있었다. Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이, 두께가 0.4  $\mu\text{m}$ 인 경우 1차 모드뿐 아니라 2차 모드가 주파수 4 GHz 이상에서 나타남을 확인하였다. 두께가 0.6  $\mu\text{m}$ 인 경우는, 1차, 2차 모드에 이어 3차 모드가 함께 관찰되기 시작한다. 두께가 0.8  $\mu\text{m}$ 에서는 4차 모드가 7 GHz 이상에서 나타나며, Fig. 7(c)에 나타나있듯이, 두께가 1.0  $\mu\text{m}$ 인 그 다음 차수의 모드가 8 GHz 부근에서 관찰되기 시작한다.

위에서 관찰한 금속박막의 분산특성은 실제 측정을 위해 박막을 측정하는 조건을 결정하는데 있어 중요한 정보를 제공한다. 현재 수 GHz 영역대의 초음파를 이용한 박막물성 측정 기술 개발이 활발히 이루어지고는 있으나, 아직까지는 MHz 단위의 초음파를 이용한 방법이 좀 더 일반적이다. 예를 들어, 초음파 현미경을 이용하는 경우, 가장 널리 쓰이는 렌즈의 주파수 영역은 200 또는 400 MHz이며, 레이저 기반 유도초음파를 이용

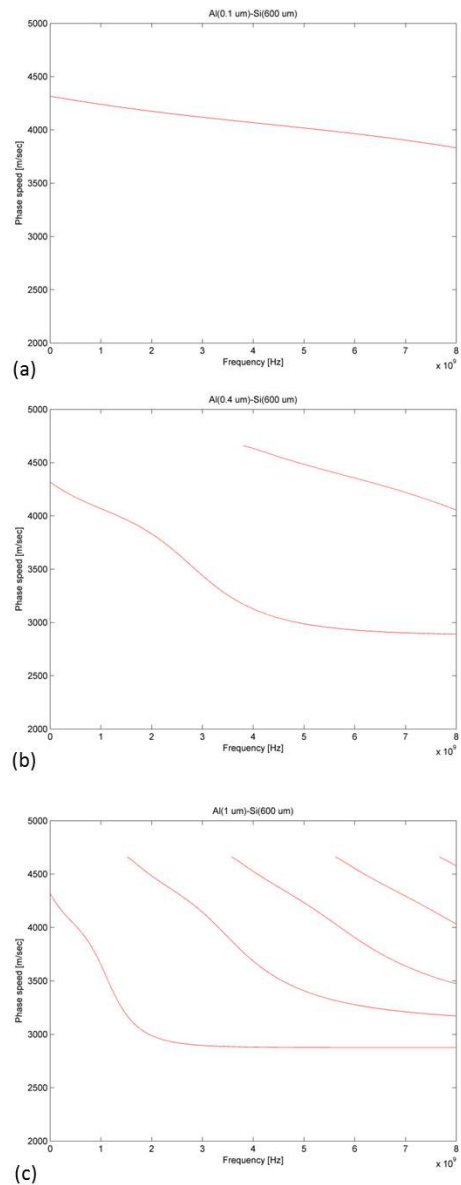


Fig. 7 Dispersion curve for Al thin film on Si substrate (600  $\mu\text{m}$ ): (a) 0.1  $\mu\text{m}$ -thick Al, (b) 0.4  $\mu\text{m}$ -thick Al, and (c) 1  $\mu\text{m}$ -thick Al.

하여 박막에 대한 측정을 수행할 시에는, 가진할 수 있는 초음파 영역은 보통 100 MHz이내인 것이 일반적이다. 박막에서의 분산특성을 이용하여 재료의 탄성특성을 평가하기 위해서는, 본 논문에서와 같이 분산곡선 분석을 통해 분산특성이 나타나는 박막의 두께와 주파수 대역의 상관관계에 관한 정보를 실제 측정에 활용할 수 있겠다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유도초음파 기반 다층박막의 분산 특성을 계산, 분석하였다. 전달행렬법을 이용하여 다층판의 분산곡선을 계산하는 프로그램을 제작하여, 이를 Al-steel과 Al composite 두 시편에 대하여 적용하였다. 정확성 검증을 위해 상용 프로그램인 Disperse를 이용하여 얻은 분산선도와 비교, 분석하여 전달행렬법을 이용하여 얻은 결과의 타당성을 확인하였다. 나노/마이크로 박막의 분산 특성을 연구하기 위하여 실리콘 기판 위에 증착된 알루미늄 박막의 분산곡선을 두께별로 계산하여 그 특성을 분석하였다. 이는 실제 측정을 위해 필요한 박막의 두께 범위를 파악하는데 유용한 정보를 제공하는 것으로 판명되었다. 따라서 분산선도를 통해 얻은 정보들은 실제 박막의 제작, 물성 측정에 있어 유용함을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 좀 더 다양한 금속 박막의 분산특성에 대한 데이터베이스를 이론적인 토대를 구축하는데 활용될 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 연구 지원한 (NRF-2013 M2A2A9043274)의 결과물입니다.

#### 참고문헌

- [1] D.-J. Lee, Y. Cho, K.-W. Jang, S.-H. Cho and B.-Y. Ahn, "Measurement of elastic constants of thin metallic foil by guided wave dispersion characteristics," *J. of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 41-46 (2012)
- [2] Y. C. Lee, J. O. Kim and J. D. Achenbach, "Acoustic microscopy measurement of elastic constants and mass density," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 42, pp. 253-264 (1995)
- [3] D. Xiang, N. H. Nelson and G. V. Blessing, "The design, construction and application of a large aperture lens-less line-focus PVDF transducer," *Ultrasonics*, 34, pp. 641-647 (1996)
- [4] M. Radovic, E. Lara-Curzio and L. Riester, "Comparison of different experimental techniques for determination of elastic properties of solids," *Materials Science and Engineering*, A368, pp. 56-70 (2004)
- [5] C. M. Hernandez, T. W. Murray and S. Krishnaswamy, "Photoacoustic characterization of the mechanical properties of thin films," *Appl. Phys. Lett.*, 80(4), pp. 691-693 (2002)
- [6] L.-S. Wei, C.-H. Chung and Y.-C. Lee, "Non-destructive determination of elastic constants of thin plates based on PVDF focusing ultrasound transducers and Lamb wave measurements," 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China (2008)
- [7] W. T. Thomson, "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium," *J. Appl. Phys.*, 21, pp. 89-93 (1950)
- [8] N. A. Haskell, "Dispersion of surface waves on multilayered media," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 43, pp. 17-34 (1953)
- [9] M. J. S. Lowe, "Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42, 4, pp. 525-542 (1995)
- [10] K. F. Graff, "Wave Motion in Elastic Solids," Ohio State University Press (1975)
- [11] L. E. Malvern, "Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium," No. Monograph (1969)
- [12] F. Honarvar, E. A. Enjilela and N. Sinclair, "An alternative method for plotting dispersion curves," *Ultrasonics*, 49, pp. 15-18 (2009)