

나노스케일 멤브레인에서 레이저 초음파로 여기된 램파의 전파 특성

Characteristics of Lamb Wave Propagation on a Nanoscale Membrane Induced by a Laser Ultrasonic Technique

김윤영^{1,#}
Yun Young Kim^{1,#}

¹ 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

Corresponding Author / E-mail: y.kim@cnu.ac.kr, TEL: +82-42-821-6648

ORCID: 0000-0001-8945-9843

KEYWORDS: Lamb wave (램파), Laser ultrasonics (레이저 초음파), Nanoscale membrane (마이크로 멤브레인), Wave propagation (파동 전파)

A lamb wave propagation behavior on a freestanding nanoscale membrane was investigated using a laser ultrasonic technique in the present study. A 110-nm thick aluminum (Al) layer was deposited on a rectangular 200-nm thick silicon nitride (SiN) membrane and the Lamb wave was launched using a pulsed laser. The transfer matrix technique was employed to obtain a theoretical dispersion curve so that material properties of the SiN membrane could be estimated through curve-fitting. In addition, picosecond ultrasonic measurement was used to characterize the Al film. Results showed that the dispersive behavior of Lamb wave in the fundamental antisymmetric mode could be clearly observed on the membrane. However, comparison of dispersion curves indicated that the effect of residual stress of the film became more influential at a low dimensional scale.

Manuscript received: January 20, 2025 / Revised: April 3, 2025 / Accepted: April 11, 2025

NOMENCLATURE

A = Amplitude
B = Product of Effective Elastic Modulus and Thermal Expansion Coefficient
 C_p = Specific Heat
c = Effective Elastic Modulus
D = Field Matrix
 $\mathcal{D}$ = Flexural Rigidity
d = Film Thickness
f = Frequency
 I_0 = Laser Intensity
i = Interface
k = Wavenumber
L = Longitudinal Wave Component

$\mathcal{L}$ = Layer Matrix
l = Layer
R = Reflectance
S = Shear Wave Component
 $\mathcal{S}$ = System Matrix
t = Time
u = Displacement
v = Velocity
W = Laser Heating Function
w = Angular Frequency
 Φ = Phase
 β = Absorption Depth
 κ = Thermal Conductivity
 λ = The 1st Lamé's Constant

μ	= The 2 nd Lamé's Constant
ρ	= Density
σ	= Stress
τ	= Laser Pulse Width
ϕ	= Scalar Function
ψ	= Vector Function

1. 서론

램파(Lamb Wave)를 활용한 기술은 구조물의 비파괴 검사와 건전성 모니터링 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 램파는 판재 형태의 고체 매질 내에서 전파되는 유도초음파로, 진동 특성에 따라 대칭모드(Symmetric Mode, S)와 반대칭모드(Antisymmetric Mode, A)가 있으며, S_0 과 A_0 두 가지 기본 모드 이외에도 주파수의 증가에 따라 S_1 , A_1 , S_2 , A_2 등으로 지칭되는 다양한 고차 모드가 존재한다[1]. 램파는 에너지 손실이 적고 전파거리가 길기 때문에 항공기, 선박, 압력용기 등 많은 산업 분야에서 부식, 균열, 계면박리, 잡손상 등의 검출을 위한 필수적인 기술로 자리잡고 있다[2-4].

램파를 여기 혹은 검출하기 위하여 접촉식 초음파 탐촉자나 전자기음향 트랜스듀서(Electromagnetic Acoustic Transducer)를 활용하는 것이 일반적이지만, 레이저 초음파 기법을 이용하면 커플러(Couplant) 없이도 고온, 방사선 등 가혹환경에서도 측정이 가능하고, 높은 시공간적 분해능으로 검출 정밀도를 높일 수 있으며, 빠른 스캐닝으로 검사속도를 단축시켜 대형 구조물의 결함 탐지를 효율적으로 할 수 있으므로 최근에는 레이저를 이용한 비접촉식 계측에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다[5]. 특히, 수 나노초에서 수 백 펨토초에 이르는 짧은 레이저 펄스폭과 메가헤르츠에 이르는 높은 반복률, 그리고 광학계를 사용하여 레이저 광을 수 마이크로미터 이하의 크기로 집속할 수 있는 분해능은 반도체, 디스플레이 등 전기전자 제조산업에 활용되는 마이크로/나노스케일 소재와 구조물의 특성평가에 적합하다[6,7].

따라서 본 연구에서는 레이저 초음파 기법이 갖는 장점을 활용하여 나노스케일 멤브레인 구조에서 전파하는 램파의 특성을 분석하고자 한다. 펄스 레이저를 사용하여 램파를 여기시켰으며, 레이저 간섭계를 사용하여 표면변위를 측정함으로써 매질 내에서 전파하는 파동을 검출하였다. 아울러 전단행렬법을 이용하여 이론해를 구함으로써 실험결과와 비교 분석하였으며, 해석 시 입력값으로 필요한 박막의 물성을 구하기 위하여 피코초 초음파 기법을 병행하였다.

2. 이론

2.1 전달행렬법을 이용한 분산곡선 계산

램파의 이론적 분산곡선을 계산하기 위하여 전달행렬법[8]을

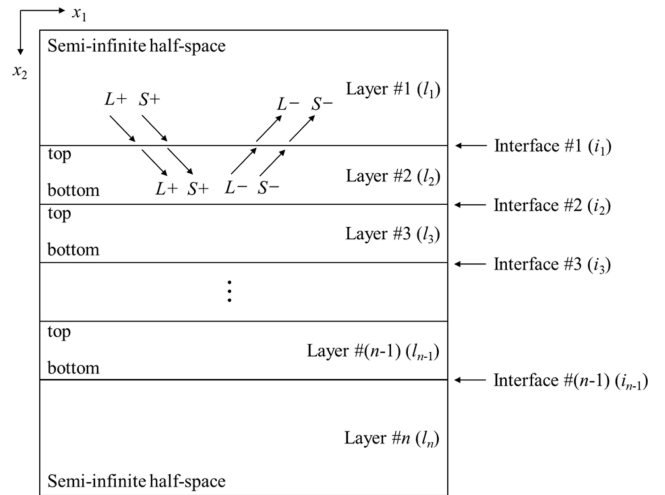


Fig. 1 A schematic of the multilayered structure for the transfer matrix analysis

사용하였으며, 그 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다: 3차원 직교좌표계에서 무한 탄성체 내의 평면파에 대한 방정식은 식(1)과 같이 기술된다.

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

여기서 ρ 는 밀도를, $\mathbf{u}$ 는 변위를, t 는 시간을, 그리고 λ 와 μ 는 각각 라메의 제1계수와 제2계수를 뜻한다. Helmholtz의 분산 정리[9]를 적용하여 파동을 종파성분(L)과 횡파성분(S)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_L + \mathbf{u}_S \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_L = \nabla \phi = \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ 0 \end{Bmatrix} A_{(L)} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_S = \nabla \times \boldsymbol{\psi} = \begin{Bmatrix} k_2 \\ -k_1 \\ 0 \end{Bmatrix} A_{(S)} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{k}$ 는 파수를, 그리고 ω 는 각주파수를 뜻한다. 또한, $A_{(L)}$ 과 $A_{(S)}$ 는 각각 종파와 횡파변위의 진폭을 뜻한다. Fig. 1과 같이 반무한 매질 내에 존재하는 다층판 구조를 생각해 보면 스넬(Snell)의 법칙에 따라 식(5)와 같은 공통변수가 도출된다.

$$F = e^{i(k_1 x_1 - \omega t)} \quad (5)$$

각 계면을 중심으로 상부에서 입사하여 하부로 전파하는 종파와 횡파를 각각 (L+), (S+)로 나타내고, 하부에서 입사하여 상부로 전파하는 종파와 횡파를 (L-), (S-)로 나타낸다면, 변위 및 응력과 진폭의 관계는 식(6)과 같이 행렬 형태로 기술된다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} A_{(L+)} \\ A_{(L-)} \\ A_{(S+)} \\ A_{(S-)} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $[D]$ 는 각속도와 파수, 밀도, 그리고 종파와 횡파의 속도로 결정되는 4×4 크기의 장(Field) 행렬이다. 각 층에서 윗면과 아랫면의 변위와 응력 관계는 아랫면의 장행렬과 윗면의 장행렬의 역행렬의 곱으로 표현할 수 있으며, 이를 층(Layer)행렬 $[\mathcal{L}]$ 로 지칭한다. 예를 들어, Fig. 1의 l_2 에 대하여 식(7)의 관계를 갖는다.

$$[\mathcal{L}]_{l_2} = [D]_{l_2, bottom} [D]_{l_2, top}^{-1} \quad (7)$$

같은 방법으로 모든 층에 대하여 식을 도출하면 식(8)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix}_{l_n, top} = [\mathcal{S}] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix}_{l_2, top} \quad (8)$$

그리고 $[\mathcal{S}]$ 는 시스템행렬이다:

$$[\mathcal{S}] = [\mathcal{L}]_{l_2} [\mathcal{L}]_{l_2} \dots [\mathcal{L}]_{l_{(n-1)}} \quad (9)$$

본 연구에서는 고려하는 고체매질은 판재 형태의 멤브레인이므로 Layer #1과 Layer #n은 진공으로 고려할 수 있으며, 경계면 i_1 과 $i_{(n-1)}$ 은 무응력(Traction-free) 상태이다. 따라서 식(8)은 식(10)과 같이 기술된다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{l_n, top} = [\mathcal{S}] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{l_2, top} \quad (10)$$

식(10) 좌변의 $\sigma_{22} = 0$ 과 $\sigma_{21} = 0$ 에 대하여 $[\mathcal{S}]$ 의 부분행렬로 나타내면 식(11)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathcal{S}_{31} & \mathcal{S}_{32} \\ \mathcal{S}_{41} & \mathcal{S}_{42} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}_{l_2, top} = [\mathcal{S}'] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}_{l_2, top} \quad (11)$$

최종적으로 $\det[\mathcal{S}'] = 0$ 인 해를 찾으면 관심 주파수 구간에서 위상속도를 구할 수 있다.

2.2 피코초 초음파 기법

박막 내에서 전파하는 체적종파를 계산하기 위하여 식(12)의 파동방정식을 고려한다[10].

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - B \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

여기서 c 는 유효탄성계수를, B 는 c 와 열팽창계수를 곱한 값을 뜻한다. T 는 온도를 뜻하며, 식(13)과 같이 1차원 과도 열전도 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W \quad (13)$$

이때, C_p 는 비열을, κ 는 열전도도를, W 는 레이저 가열함수를 뜻한다.

$$W(z, t) = \begin{cases} \frac{I_0(1-R)\beta}{2} \exp(-\beta z) \sin^2\left(\frac{\pi t}{2\tau}\right) & 0 \leq t \leq 2\tau \\ 0 & t \geq 2\tau, t < 0 \end{cases} \quad (14)$$

여기서 I_0 는 레이저 강도를, R 은 반사율을, β 는 흡수깊이를, τ 는 펄스폭이다. 알루미늄(Al)과 질화규소(SiN)의 계면에서 경계조건은 식(15) 및 식(16)과 같다.

$$u_{Al}|_{z=d} = u_{SiN}|_{z=d} \quad (15)$$

$$c_{Al} \frac{\partial u_{Al}}{\partial z} - B_{Al} T_{Al}|_{z=d} = c_{SiN} \frac{\partial u_{SiN}}{\partial z} - B_{SiN} T_{SiN}|_{z=d} \quad (16)$$

d 는 알루미늄 박막의 두께이다. 박막은 초기 휴지(Initially Rest) 상태이므로 식(17) 및 식(18)과 같다.

$$u|_{t=0} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (18)$$

이로부터 얻은 이론해를 실험결과와 곡선맞춤 하면 박막의 기계적 물성을 구할 수 있다.

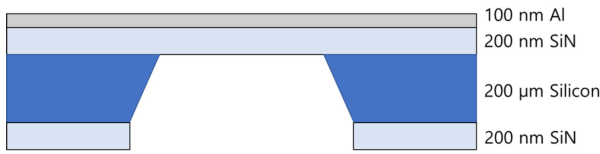
3. 실험

3.1 시료제작

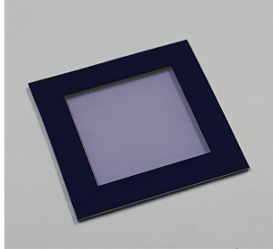
본 실험에서 사용된 마이크로 멤브레인은 Norcada社의 QX151000D 모델로, 한 변이 10 mm 길이의 정사각형 모양이며, 200 nm 두께의 질화규소 재질로 제작되었다. 다만, 질화규소는 가시광선-자외선 파장대역에서 투과도가 높으므로 레이저 광의 흡수와 반사를 위해 전자빔 증착기를 사용하여 멤브레인 표면에 110 nm 두께의 알루미늄 박막층을 형성하였다. Fig. 2에 시료의 단면을 도식적으로 나타내었다.

3.2 피코초 초음파 실험

알루미늄 박막의 물성을 측정하기 위하여 피코초 초음파 실험을 실시하였다. 나노미터 두께를 갖는 박막은 증착법이나 조건에 따라 물성이 달라질 수 있기 때문에 실험을 통하여 직접 측정값을 계산에 활용하였다. 광원은 펄스폭 75 fs, 반복률 80 MHz, 파장 780 nm, 평균 2.5 W 출력의 펄스 레이저 시스템이며, 레이저 광을 10 : 1의 강도비로 분할하여 펌프(Pump) 펄스와 프로브(Probe) 펄스를 시료 표면에 조사하였다. 전동 선형 스테이지를 사용하여 광경로차를 발생시켰으며, 광검출기에서 전기적 신호로



(a) A schematic picture of the cross-section of the membrane



(b) A photo of the 10 mm × 10 mm silicon nitride membrane before the aluminum deposition

Fig. 2 The nanoscale membrane specimen

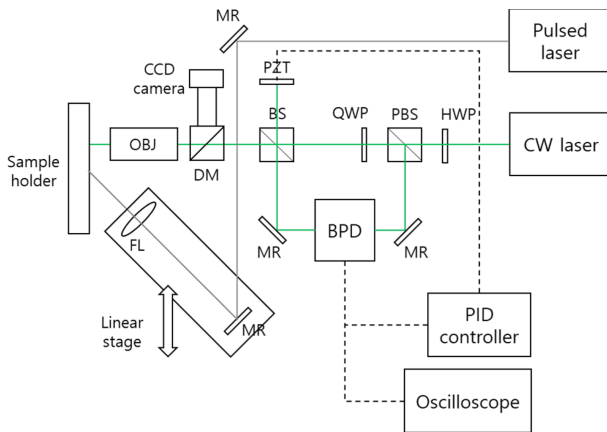


Fig. 3 A schematic picture of the laser optical setup. BPD: balanced photodetector, BS: beamsplitter, CCD: charge-coupled device, CW: continuous wave, DM: dichroic mirror, FL: focusing lens, HWP: half-wave plate, MR: mirror, OBJ: objective lens, PBS: polarizing beamsplitter, PID: proportional-integral-differential, PZT: piezostack, QWP: quarter-wave plate

변화된 반사를 변화는 락-인 증폭기를 통하여 컴퓨터의 랩뷰 (LabVIEW) 인터페이스에서 기록되었다.

3.3 램파 실험

Fig. 3은 램파 측정 실험장치의 개략도를 나타낸다. 램파를 여기시키기 위하여 파장 1,030 nm, 펄스폭 1.5 ns, 반복률 2 kHz의 펄스레이저를 사용하였으며, 가전점과 수신점 사이의 거리를 조절할 수 있도록 거울과 집속렌즈를 선형 스테이지에 장착하였다. 초음파의 전파에 따른 표면변위를 측정하기 위하여 532 nm 파장, 150 mW 출력의 연속파 레이저를 광원으로 하는 마이켈슨 간섭계를 사용하였다. 펄스 레이저를 집속조사할 때에 시료 표면에서 광삭마가 일어나지 않는지 관찰하기 위하여 CCD 카메라가 장착된 이미징

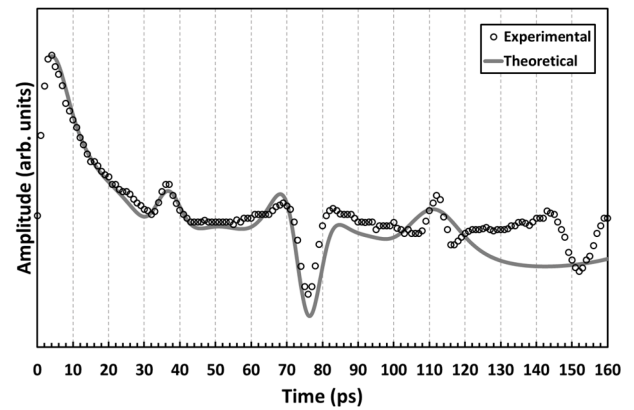


Fig. 4 The picosecond ultrasonics experiment result

시스템을 구축하였다. 광경로차에 따른 간섭무늬의 밝기 변화는 균형광검출기에 입력되어 오실로스코프에서 시간영역의 파형으로 기록되었다. 이때, 간섭계에 미치는 외란의 영향을 줄이기 위하여 PID (Proportional-integral-differential) 제어기를 사용하여 기준거울에 부착된 피에조스택(Piezo Stack)에 전압 신호를 가하였다.

수집된 램파의 분산속도 (v)는 식(19)로 계산된다.

$$v(f) = \frac{(x_2 - x_1)2\pi f}{[\Phi_2(f) - \Phi_1(f)]} \quad (19)$$

여기서 f 는 주파수를, Φ 는 시간영역 파형을 고속 푸리에 변환하여 얻는 위상값을 뜻한다.

4. 결과 및 토의

4.1 피코초 초음파 실험

Fig. 4는 피코초 초음파 실험으로부터 얻은 파형이다. $t = 0$ ps 시점에서 펄스 레이저가 시료의 표면에 입사할 때에 일어나는 국소적 열팽창으로 인하여 체적종파가 발생되며, 적층박막의 각 계면에서 반향되는 파동이 피크 형태의 신호로 관찰된다: Al/SiN 계면에서 반사되는 종파에 의해 37 ps 부근에서 첫 번째 피크가 관찰되며, 자유지지된 SiN의 바닥면으로부터 반사된 종파에 의해 76 ps 지점에서 두 번째 피크가 관찰된다. Al과 SiN 종파 속도의 문헌값은 각각 6,420 m/s와 10.9 km/s 내외로 알려져 있으며[11], 종파속도(v_L)는 식(20)으로 계산된다.

$$v_L = 2d/t \quad (20)$$

110 nm 두께의 Al과 200 nm의 SiN에 대하여 각각 5,945 m/s와 10,256 m/s의 종파속도가 계산되며, 이는 문헌값과 각각 7.4%와 6.0% 오차 값을 갖는다. 이로부터 Fig. 4의 76 ps 지점에서는 Al/SiN 계면에서 표면으로 도달한 종파가 다시 계면으로 반향되어 재도달하는 2차 피크 신호와, SiN 바닥면에서 표면으로 도달한 신호가 중첩된 것을 유추할 수 있다. 실험결과와 이론해의 곡선 맞춤을 통하여 70 GPa의 Al 탄성계수 값을 얻었다. 계산시 SiN의

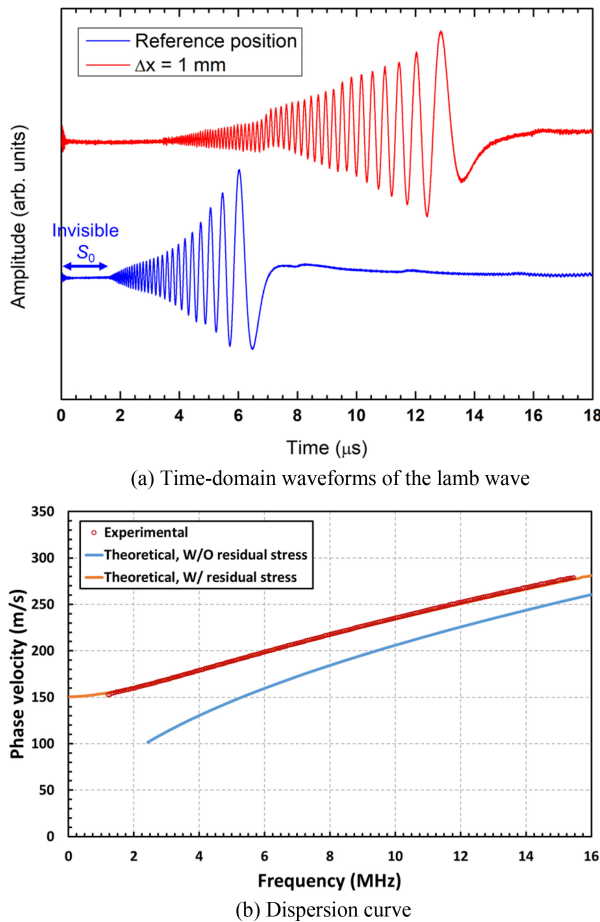


Fig. 5 The lamb wave experiment results

탄성계수(270 GPa)와 밀도(3,100 kg/m³)는 제조사의 사양값을, Al의 밀도는 2,700 kg/m³를 사용하였으며, 푸아송비는 문헌값(각각 0.27과 0.33)을 사용하였다.

4.2 램파 실험

Fig. 5(a)는 오실로스코프에서 수집된 시간영역의 램파 신호를 보여준다. 두 지점간의 거리차(Δx)는 1 mm이며, 전파거리가 길어질수록 분산특성이 더욱 강해지는 것을 확인할 수 있다. 또한, A_0 모드의 파형은 명확하게 나타나는 반면 S_0 모드는 보이지 않는데, 이는 낮은 신호 대 잡음비로 인하여 초기 잡음 신호와 구분되지 않거나, 레이저의 국소가열 및 탄성적으로 비대칭적인 멤브레인 적층구조 형태에 기인하는 것으로 판단된다. 레이저 펄스 에너지를 증가시키면 신호가 보다 강해지지만 광학마가 발생하면 안되기 때문에 본 연구에서는 임계점 이하로 에너지를 유지하였다.

Fig. 5(b)는 식(19)를 사용하여 실험결과로부터 얻은 분산곡선과 전달행렬법을 사용하여 구한 이론해를 비교한 결과이다. 주파수가 감소함에 따라 위상속도값의 차이가 22.4에서 61.4 m/s로 증가하였는데, 이처럼 낮은 주파수에서 차이가 나는 원인으로 Rogers와 Nelson [12]이 관찰한 잔류응력 효과를 생각해볼 수 있다: 밀리미터 두께의 평판과는 달리 박막에서는 잔류응력에 의한 영향성이 더욱 크며, 파수벡터의 크기가 0에 가까울수록 S_0 모드와

A_0 모드는 잔류응력과 밀도의 비에 따라 분산곡선의 편차가 증가한다. A_0 모드의 위상속도는 식(21)로 표현된다[12].

$$v_{A_0} = \sqrt{\frac{\mathcal{D}}{\rho d} k^2 + \frac{\sigma_{res}}{\rho}} \quad (21)$$

여기서 $\mathcal{D}$ 는 멤브레인의 굽힘강성을, σ_{res} 는 잔류응력을 뜻한다. 이로부터 $\sigma_{res} = 64$ MPa의 값에 대하여 위상속도 값의 차이를 보정하였을 때에 본 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 유도초음파의 주파수 대역이 낮으면 산란 및 감쇠가 상대적으로 작은 장점이 있으나 미세결함을 검출하기는 어려운 특징이 있다. 반대로, 주파수 대역이 높으면 전파거리는 짧아지지만 국소물성 평가나 미세결함 검출에는 보다 적합하다. 따라서, 밀리미터 두께의 박판을 검사평가하기 위해서는 kHz 대역의 초음파를, 나노스케일 멤브레인 구조에서는 MHz 대역을 사용하는 것이 통상적이다. 다만, 본 연구에서 사용한 레이저 초음파 가진 기법은 광대역(Broadband)적인 특징을 가지므로 여러 주파수 성분과 모드가 동시에 발생할 수 있어 검사와 해석을 어렵게 만든다. 이를 보완하려면 간섭법[13], 표면 나노패턴[14] 등의 방법을 사용하여 주파수를 제어하는 것이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 나노스케일 박막으로 제작된 멤브레인에서 전파하는 램파의 거동을 레이저 초음파 기법으로 관찰하였다. 펄스 레이저로 파동을 생성하고 마이켈슨 간섭계로 검출하였으며, 피코초 실험을 통하여 얻은 100 nm 두께의 Al과 200 nm SiN의 물성을 대입하여 분산곡선을 분석하였다. 나노스케일 멤브레인에서도 램파가 확연하게 관찰된 반면, 벌크(Bulk) 재료와는 달리 잔류응력의 영향성이 더 큰 것을 확인하였다. 다만, 본 연구에서는 관찰되지 않았던 S_0 모드의 파형을 검출하기 위해서는 RIE (Reactive Ion Etching) 등의 반도체 식각 공정을 사용하여 멤브레인의 SiN 층을 제거할 필요가 있으며, 이는 후속 연구에서 다루고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

REFERENCES

1. Rose, J. L., (2014), Ultrasonic guided waves in solid media, Cambridge University Press.
2. Choi, H., Lee, J., Cho, Y., (2016), Experimental study on corrosion detection of aluminum alloy using Lamb wave mixing technique, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 40(11), 919-925.

3. Kim, B.-S., Kwon, H.-S., Kim, J.-W., Roh, Y.-R., (2009), Local/global structural health monitoring system using piezoelectric sensors, *Journal of the Acoustical Society of Korea*, 28(4), 308-317.
4. Jhang, K.-Y., Kim, H.-J., Ceringlia, D., Djordjevic, B., (2001), Non-contact ultrasonic testing of aircraft joints using laser generated Lamb wave, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 21(2), 163-168.
5. Zheng, S., Luo, Y., Xu, C., Xu, G., (2023), A review of laser ultrasonic Lamb wave damage detection methods for thin-walled structures, *Sensors*, 23(6), 3183.
6. Murray, T. W., Krishnaswamy, S., Achenbach, J. D., (1999), Laser generation of ultrasound in films and coatings, *Applied Physics Letters*, 74(23), 3561-3563.
7. Kim, Y. Y., Krishnaswamy, S., (2012), Non-destructive evaluation of material properties of nanoscale thin-films using ultrafast optical pump-probe methods, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 32(2), 115-121.
8. Lowe, M., (1995), Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42(4), 525-542.
9. Malvern, L., (1969), *Introduction to the mechanics of a continuous medium*, Prentice-Hall.
10. Kim, Y. Y., (2017), Thermomechanical characterization of a nanoscale thin-film using picosecond ultrasonics, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(9), 1245-1251.
11. Prakash, V., Nathenson, D., Yuan, F., (2011), Spall strength of AS800 silicon nitride under combined compression and shear impact loading, in: Proulx, T. (ed.), *Dynamic behavior of materials, Volume 1, Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, 339-347.
12. Rogers, J. A., Nelson, K. A., (1995), Photoacoustic determination of the residual stress and transverse isotropic elastic moduli in thin films of the polyimide PDMA/ODA, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42(4), 555-566.
13. Ye, T.-M., Xu, Y.-F., Hu, W.-X., (2018), Generation of narrowband Lamb waves based on the Michelson interference technique, *Chinese Physics B*, 27(5), 054301.
14. Malfanti, I., Taschin, A., Bartolini, P., Bonello, B., Torre, R., (2011), Propagation of acoustic surface waves on a phononic surface investigated by transient reflecting grating spectroscopy, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(11), 2370-2381.



Yun Young Kim

Associate professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is laser ultrasonics for thin-films.

E-mail: y.kim@cnu.ac.kr