

## 레이저 초음파 기법을 이용한 박막 탄성계수 측정

### Elastic modulus measurement of thin films using laser generated guided ultrasonic waves

조승현†‡ · 허태훈\* · 지봉규\* · 안봉영\* · 장강원\*\*

Seung Hyun Cho, Taehoon Heo, Bonggyu Ji, Bongyoung Ahn and Gang-Won Jang

**Key Words** : Laser based ultrasonic(레이저 기반 초음파), Guided wave(유도초음파), Thin films(박막), Elastic modulus(탄성계수)

#### ABSTRACT

Regarding thin films in MEMS/NEMS structures, the exact evaluation of mechanical properties is very essential to enhance the reliability of their design and manufacturing. However, such methods as a tensile test and a resonance test, general methods to measure elastic moduli, cannot be applied to thin films since its thickness is so small. This work concerns guided wave based elastic modulus measurement method. To this end, guided wave excitation and detection system using a pulsed laser and a laser interferometry has been established. Also an elastic modulus extraction algorithm from the measured guided wave signal was developed. Finally, it was applied to actual thin film structures such as Ni-Si and Al-Si multilayers. From experimental results, we confirm that the proposed method has considerable feasibility to measure elastic properties of thin films.

#### 1. 서 론

탄성계수는 재료의 기계적 특성을 대표하는 고유의 물성으로 특정 재료의 올바른 이용과 개발된 재료의 특성 평가를 위하여 정확히 측정되어야 할 인자이다. 탄성계수는 일반적으로 인장 시험으로 측정되고 있으나, 최근에는 음향공진법 또는 초음파법을 이용한 동 탄성계수의 측정으로 탄성계수가 평가되기도 한다. 인장시험에 의한 정 탄성계수에 비하여 음향공진법이나 초음파법을 이용한 동 탄성계수 측정법은 비파괴적인 측정기술일 뿐 아니라 측정 불확도 또한 낮아 정밀한 탄성계수의 평가에 많이 이용되고 있다. 하지만, 이러한 측정 방법은 비교적 두

꺼운 구조체에 대한 측정에 이용되는 기술로서, 대상이 얇은 판 또는 코팅, 박막인 경우에는 적용이 쉽지 않다. 최근, 두께 수 마이크로미터 이하의 다양한 박판 및 박막 구조가 집적회로, 자기저장장치, 광학필터, 박막 코팅, 생체 재료로써 첨단 산업 분야에 응용되고 있기 때문에 이들 박막 구조물의 탄성계수를 정밀하게 측정할 수 있는 새로운 기술의 개발이 요구되고 있다. 최근 박막의 두께나 기계적 물성 측정을 위해 SEM을 이용한 현미경적 방법, 탐침을 이용한 기계적 방법, 분광 반사광도계나 엘립소미터를 이용하는 광학적인 방법, 전기비저항 측정 방법, 나노압입 실험법 등이 적용되고 있으나, 불확도가 크고 표면에 흠집을 남기는 등 적용상의 어려움이 존재한다.

일본 효고 대학의 나마즈 연구실에서는 마이크로 인장 시험기를 개발하여 고온 인장 시험을 수행하였고 X-ray를 이용한 인장시험 시 박막시편의 두께 변화를 측정함으로써 푸와송비를 측정하는 기술, 오사카 대학의 오기와 히라오 교수는 RUS/Laser

† ‡ 교신저자 · 발표자; 정회원, 한국표준과학연구원 안전측정센터

E-mail : seungcho@kriss.re.kr

Tel : (042)868-5752 , Fax : (042)868-5639

\* 한국표준과학연구원

\*\* 세종대학교 기계항공우주공학부

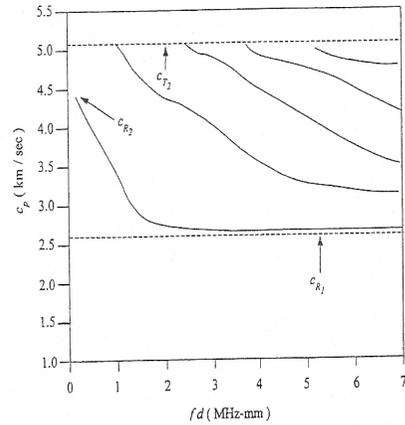
(Resonance Ultrasound Spectroscopy) 시스템을 이용하여 수  $\mu\text{m}$  두께를 갖는 구리 박막의 탄성계수를 평가하는 기술을 개발하였다<sup>(1)</sup>. 독일 뮌헨 대학의 Deger<sup>(2)</sup>, 일본 도호쿠 대학의 Kushibiki 교수<sup>(3)</sup>, 대만 첩궁대학의 Wei 교수등<sup>(4)</sup>은 초음파 현미경을 이용하여 박막의 탄성계수를 평가하고자 하였으며, 미국 Northwestern 대학의 S. Krishnaswamy 교수<sup>(5)</sup>, 미국 NIST의 Hurley<sup>(6)</sup>, 중국 난징대학의 Li 등<sup>(7)</sup>은 레이저를 이용한 유도초음파 (표면파 또는 판파)의 전파속도를 측정하여 박막 재료의 탄성계수를 평가하고자 하였다.

이제까지 진행된 연구에 따르면 박막의 탄성계수의 평가는 압입시험법과 초음파법이 가장 적합한 것으로 평가되고 있다. 그러나 압입 시험법은 측정 정확도가 우수하나 숙련된 측정기술이 필요하고 표면에 미세한 자국이 남는 등의 문제가 있다. 반면 초음파법은 완전한 비파괴적 방법이지만 박막 구조에서 진행하는 초음파는 유도초음파의 형태로 진행하므로 박막의 두께와 진행하는 초음파 파장의 상대적 크기에 따라 초음파 진행 특성이 달라지는 등 해석상의 어려움이 따른다.<sup>(8-10)</sup> 또한 유도초음파의 송수신 방법에 따라 음향렌즈 또는 PVDF 필름을 이용하는 초음파 현미경 기술, 레이저를 이용하여 박막 표면에 국부적인 열 변형을 유도하고 레이저 간섭계를 이용하여 표면 변위를 측정하는 레이저 이용 기술로 나누어진다.<sup>(11-13)</sup>

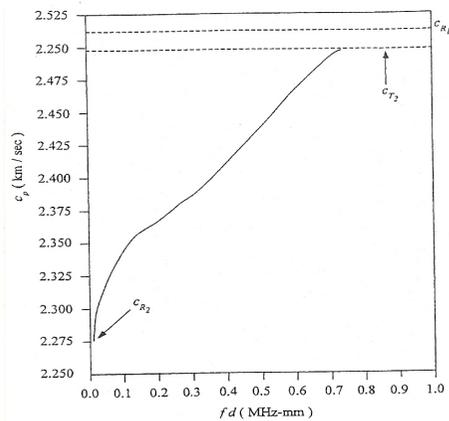
본 연구에서는 박판에 전파하는 유도초음파 측정하여 두께 10  $\mu\text{m}$  이하 박막의 탄성계수를 평가하는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 레이저 초음파 시스템을 구축하고 측정된 유도초음파를 분석하여 탄성계수를 추정하는 알고리즘을 개발하였다.

## 2. 박막 구조에서의 유도초음파 분산특성

일반적으로 박막은 기저(substrate)구조 위에 일정한 두께의 얇은 층을 이루고 있다. 일반적으로 기저의 두께는 박막의 두께에 비하여 매우 두꺼우므로 무한공간으로 볼 수 있고, 이렇게 반무한 공간과 맞닿은 얇은 층에서 전파하는 파는 Generalized Lamb Wave라고 한다. Fig. 1과 Fig. 2는 Generalized Lamb Wave 분산 곡선의 예들이다.



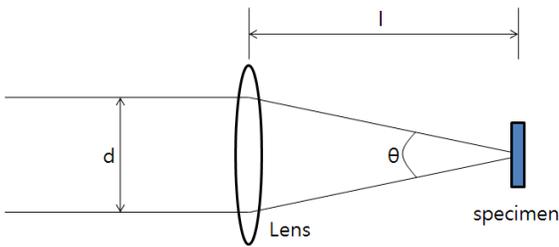
**Figure 1** Phase velocity dispersion curve for  $c_{T1} < c_{T2}$ , (soft layer on a half-space) Ref. 'Ultrasonic waves in solid media', J. Rose.



**Figure 2** Phase velocity dispersion curve for  $c_{T1} > c_{T2}$ , (hard layer on a half-space) Ref. 'Ultrasonic waves in solid media', J. Rose.

## 3. 유도초음파 송수신을 위한 레이저 시스템 제작

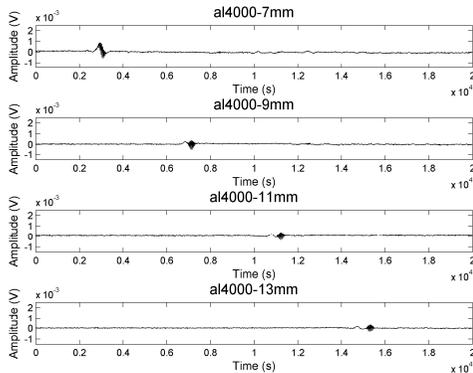
본 연구에는 박막구조물에 유도초음파를 발생 시키기 위해서 펄스레이저를 이용하였다. 발생시키고자 하는 유도초음파의 파장이 매우 좁기 때문에 Fig. 3과 같이 두 개의 평행 빔을 시편 표면에 집속하여



**Figure 3** Ultrasonic wave excitation with pulsed laser: arrangement to establish interference pattern on the specimen.

두 빔 사이의 간섭을 발생시켜 시편 표면에 주기적인 힘이 생기도록 하였다.

박판에 전파하는 초음파를 측정하기 위한 유도초음파 수신부는 마이켈슨간섭계를 이용하였다. 이때 측정 지점에 정밀 이송기를 부착하여 서로 다른 2지점의 초음파를 측정하여 유도초음파의 속도를 측정하였다. Fig. 4는 실리콘 기저위에 두께 4마이크로미터의 알루미늄 박막에서 측정된 신호를 보여준다.

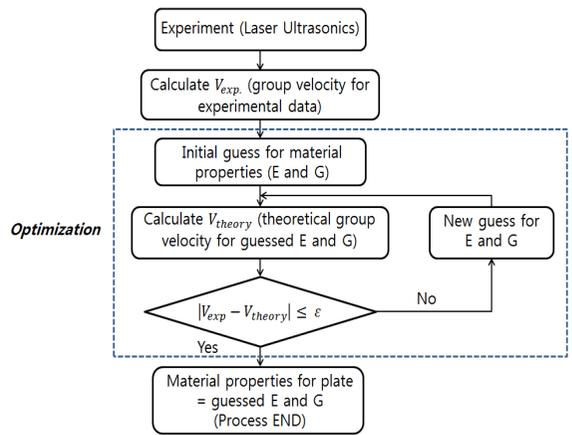


**Figure 4** Guided wave propagated in Al layer of 1,000 nm thickness coated on Si substrate.

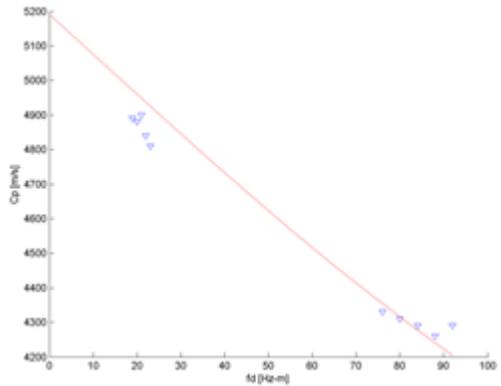
#### 4. 탄성계수의 추정

각 시편에서 측정된 유도초음파 속도와 추측된 탄성계수로부터 계산된 분산선도의 속도를 비교하여, 시편의 탄성계수를 추측한다. 이 과정이 Fig. 5에 나타나있다. Fig. 6은  $E=150 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.2$ 를 초

기값으로 설정하여 최적화를 통해 계산된 결과를 보여주고 있다. 최종적으로 최적화를 통해 얻은 값은  $E=149 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.32$  이다.



**Figure 5** Process for measuring the velocity of guided wave propagating in thin film.



**Figure 6** Optimization result of Ni-Si thin film

#### 5. 결 론

본 연구에서는 박판의 탄성계수를 비파괴적으로 측정하기 위하여, 레이저를 이용하여 박판에 전파하는 유도초음파를 송수신하여 탄성계수를 추정하는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 레이저 송수신 시스템을 구축하였으며, 측정된 유도초음파의 속도로부터 탄성계수를 추정하는 알고리즘을 개발하

었다. 결론적으로, 제안한 방법을 두께 10  $\mu\text{m}$  이하 박막에 적용하여 탄성계수를 성공적으로 측정할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) N. Nakamura, H. Ogi, and M. Hirao, 2004, "Resonance Ultrasound Spectroscopy for Measuring Elastic Constants of Thin Films", Japanese Journal of Applied Physics 43 (5B), pp. 3115 - 3118.
- (2) C. Deger et. al., 1998, "Sound Velocity of AlGa<sub>N</sub> Thin Films obtained by Surface Acoustic Wave Measurements", Applied Physics Letters 72 (19), pp. 2400 - 2402.
- (3) J. Kushibiki et. al., 2010, "Ultrasonic Microspectroscopy of ZnO Single Crystals grown by the Hydrothermal Method", Japanese Journal of Applied Physics 49, pp. 026602-1 ~ 026602-8.
- (4) L. Wei, et. al., 2008, "Nondestructive Determination of Elastic Constants of Thin Plates Based on PVDF Focusing Ultrasound Transducers and Lamb Wave Measurement", 17th WCNDT, 25-28 Oct. 2008, Shanghai, China.
- (5) F. Zhang, et. al., 2006, "Bulk-wave and guided-wave photoacoustic evaluation of the mechanical properties of aluminum/silicon nitride double-layer thin films", Ultrasonics 45 (1-4), pp. 66-76.
- (6) D.C. Hurley, et. al., 2001, "Thin-film Elastic-property Measurements with Laser-Ultrasonic SAW Spectrometry" Thin Solid Films 398-399, pp. 326-330.
- (7) Z. Li, D. Ma, S. Zhang, K. Wasa, and X. Shui, 2008, "Characterizations of Elastic Constants of Transparent Thin Films Deposited on Substrates by Laser Ultrasonic Method", Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, pp. 350-353.
- (8) J. L. Rose, 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge,.
- (9) Younho Cho, 2000, "Estimations of Ultrasonic Guided Wave Mode Conversion in a Plate with Thickness Variation", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 47(3), pp. 591-603.
- (10) Keun J. Sun and Doron Kishoni, 1993, "Feasibility of Using Lamb Waves for Corrosion Detection in Layered Aluminum Aircraft Structures", IEEE Ultrasonic Symposium.
- (11) J. Li and J. Rose, 2001, " Guided wave inspection of containment structures", Materials Evaluation 59, pp. 783-787.
- (12) W.P.Rogers, 1995, "Elastic Property Measurement Using Rayleigh-Lamb Waves", Res Nondestr Eval. 6, pp. 185-208.
- (13) J. Luis Dean, Cristina Trillo, Angel F. Doval, and Jose L. Fernandez, 2008, "Determination of thickness and elastic constants of aluminum plates from full-field wavelength measurements of single-mode narrowband Lamb waves", JASA 124 (3), pp. 1477-1489.
- (14) Yasuhisa Hayashi, Shingo Ogawa, Hideo Cho, Mikio Takemoto, 1999, "Non-contact estimation of thickness and elastic properties of metallic foils by the wavelet transform of laser-generated Lamb waves, NDT&E International 32, pp. 21-27.
- (15) T.-T.Wu, Y.-H.Liu, 1999, "Inverse determinations of thickness and elastic properties of a bonding layer using laser-generated surface waves", Ultrasonics 37, pp. 23-30.

(16) Farhang Honarvar, Esmail Enjilela, Anthony N. Sinclair, 2009, "An alternative method for plotting dispersion curves", *Ultrasonics* 49, pp.15-18.