

유도초음파 분산 특성을 이용한 박판의 탄성계수 측정

Measurement of Elastic Constants of Thin Metallic Foil by Guided Wave Dispersion Characteristics

이동진*, 조윤호**, 장강원***, 조승현****, 안봉영****†

Dong-Jin Lee*, Younho Cho**, Kang-Won Jang***, Seung-Hyun Cho****
 and Bong-Young Ahn****†

초 록 MEMS/NEMS 구조체의 개발과 응용기술의 발달로 박판 및 박막의 기계적 물성 평가에 대한 요구가 점차 늘어나고 있다. 기계적 물성은 주로 인장시험이나 초음파의 속도 측정으로 평가되어 왔으나, 박판/박막 구조의 경우 기존의 기술로는 측정에 한계가 있어 나노압입시험법, 유도초음파법 등의 새로운 기술이 개발되고 있다. 본 연구에서는 박판 구조의 금속재료의 탄성계수를 평가하기 위하여 EMAT으로 송수신된 박판내에서의 유도초음파 진행 속도를 측정하였으며, 이론적으로 계산된 유도초음파 군속도와 실험적인 군속도의 최적화 과정을 통해 최종적으로 박판의 탄성계수를 평가하였다. 두께 50 μm 의 니켈 박판에서 측정된 영률은 201.6 GPa이었으며, 나노압입시험법으로 측정된 207 GPa, 참고문헌의 203.7 GPa과 비교하면 약 3% 내에서 일치하는 결과이다.

주요 용어: 탄성계수, 금속 박판, EMAT, 유도초음파, 군속도

Abstract As the development of MEMS/NEMS structure and application technology the demand for an assessment of the mechanical properties have increased. The mechanical properties are mainly evaluated by using tensile test or ultrasonic wave measurement. However, the new technology have been developed such as nano-indentation, guided wave method because they have a limitation in case of a thin plate and thin film. In the study, the guided wave velocities are measured by electromagnetic-acoustic transducer(EMAT), the material properties of thin metallic foils are obtained using optimization process of the theoretical and experimental group velocity of guided wave. The Young's modulus obtained by the optimization process(201.6 GPa), nano-indentation(207.0 GPa) and literature value(203.7 GPa) of a 50 μm thick nickel thin plate shows good agreement within 3%.

Keywords: Elastic Modulus, Thin Metallic Plate, EMAT, Guided Wave, Group Velocity

1. 서 론

최근 기계, 전기, 전자 등 다양한 분야에서 제품의 소형화, 경량화를 위해 노력하고 있다. 이때 사용되는 수십 마이크로미터 두께 이하의 부품을

제작하기 위해서는 고비용, 고정도가 필요하므로 제작되는 과정에서의 신뢰성 확보는 필수적이다. 이를 위해 재료의 물성을 이해하여 기계적인 거동을 예측하는 것이 반드시 필요하다. 특히 마이크로 영역 이하에서는 재료의 물성이 상당히 달

[접수일: 2012. 1. 5, 수정일: 2012. 2. 8, 게재확정일: 2012. 2. 10] *한국표준과학연구원 안전측정센터/부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 기계공학부, ***세종대학교 기계항공우주공학부, ****한국표준과학연구원 안전측정센터, †Corresponding Author: Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea (E-mail: Ahnby@kriss.re.kr)

라지기 때문에 정확한 물성측정이 요구된다.

박판의 기계적인 물성을 측정하기 위해 나노압입시험법(nano-indentation)이나 인장시험 등이 이용된다. 나노압입시험법은 뾰족한 압자를 수 mN 크기의 하중으로 박판에 압입하며 나노미터 스케일로 변형시켜 그때의 경도와 탄성계수를 측정할 수 있다. 인장시험은 시편의 물성값을 직접적으로 측정할 수 있는 가장 일반적으로 사용되는 방법이다. 하지만 이들 방법은 시편을 가공해야 하고 시편에 손상을 남기는 등 어려움이 발생한다.

본 논문에서는 박판의 물성측정을 위해 유도초음파(guided wave)의 군속도를 측정하였다. 유도초음파는 구조물의 경계를 따라 진행되는 파동에너지로써 박판/박막의 표면이나 내부에 손상을 주지 않고 물성 측정이 가능하다[1-5]. 그리고 시편의 종류, 형상에 따라서 고유의 분산특성이 달라지기 때문에 시편의 위상속도나 군속도를 알 수 있다면 반대로 시편의 물성과 형상을 유추할 수 있다. 유도초음파를 이용한 물성 측정을 위해 많은 연구자들이 압전센서(PZT), LBU(laser based ultrasonics) 등을 사용하였다. W. P. Rogers는 압전센서를 이용하여 유도초음파의 S0 모드, A0 모드와 탄성계수 사이의 관계를 밝혀내었다[6]. 압전센서는 사용이 편리하여 자주 사용되었으나 쉐기(wedge)로 인해 센서 사이의 거리를 정확히 측정하기 어렵고, 일정 영역의 A0 모드는 측정이 불가능하다. 또한 시편과 센서가 접촉하기 때문에 실험의 재현성이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 이런 접촉 문제를 해소하기 위해 LBU와 같은 방법이 연구되었다[7]. 하지만 LBU는 비접촉 방법으로 고온이나 형상이 복잡한 재료에 적용할 수 있는 장점이 있지만 ablation으로 인한 표면 손상이 발생할 수 있으며, 재료의 표면 상태에 매우 민감하여 측정에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 접촉매질 없이 유도초음파의 송수신이 용이하고 미앤더 코일(meander coil)이 가지는 파장에 따라 모드 선택이 자유로운 EMAT (electromagnetic acoustic transducer)을 설계, 제작하여 측정에 이용하였다[8-11].

2. 탄성계수 추정을 위한 최적화 과정

박판 또는 박막 재료의 분산선도(dispersion curve)는 재료의 탄성계수와 밀도에 의해 아래식

과 같이 계산된다.

$$\frac{\tan\beta b}{\tan\alpha b} + \frac{4\alpha\beta\xi^2}{(\xi^2 - \beta^2)^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\tan\beta b}{\tan\alpha b} + \frac{(\xi^2 - \beta^2)^2}{4\alpha\beta\xi^2} = 0 \quad (2)$$

식(1)은 대칭파(symmetric wave), (2)은 비대칭파(antisymmetric wave)를 나타낸다. 또한 파수(wave number)의 크기에 따라 α , β 가 실수 또는 허수가 되므로 다음과 같이 $\xi > \omega/c_2$, $\omega/c_2 > \xi > \omega/c_1$, $\xi < \omega/c_1$ 의 3가지 영역[12]을 고려하여 Matlab의 fzero 함수를 이용하여 분산선도를 계산하였다. 그리고 군속도를 구하기 위해 유한차분법(finite difference method)을 사용하였다.

$$V|_{\omega=\omega^*} = \frac{d\omega}{d\xi}|_{\omega=\omega^*} \approx \frac{\Delta\omega}{\xi|_{\omega=\omega^*+\Delta\omega} - \xi|_{\omega=\omega^*}} \quad (3)$$

이때 $\Delta\omega$ 는 100 rad/sec이다. 재료의 탄성계수 변화에 따라 Fig. 1과 같이 각각의 군속도의 차이가 발생한다. 즉 영률(Young's modulus) E 와 전단탄성계수(shear modulus) G 가 10% 증가하였을 경우 분산곡선의 변화를 보여준다. Fig. 2는 유도초음파의 속도 측정으로부터 재료의 탄성계수를 평가하는 흐름도이다[13]. 초기값으로 설정된 적절한 크기의 재료물성을 바탕으로 유도초음파 분산곡선을 계산하고 계산에 사용된 일정한 주파수에서의 군속도를 측정된 군속도와 비교한다. 계산된 군속도와 측정된 신호의 군속도의 차이가 알고리즘에서 설정된 차이보다 작아질 때까지 반복하여 새로운 탄성계수를 예측하며 최종적으로 두 결과의 차이가 설정된 차이보다 작아지면 이를 재료

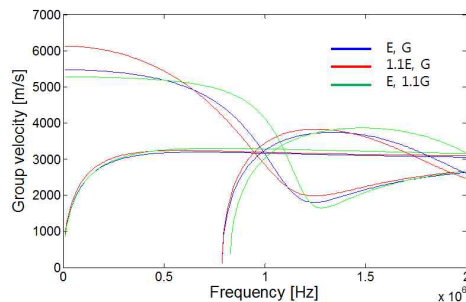


Fig. 1 Variation of dispersion curve for E 10% increase(dot line), normal(solid line), G 10% increase(dashed line) on Al plate

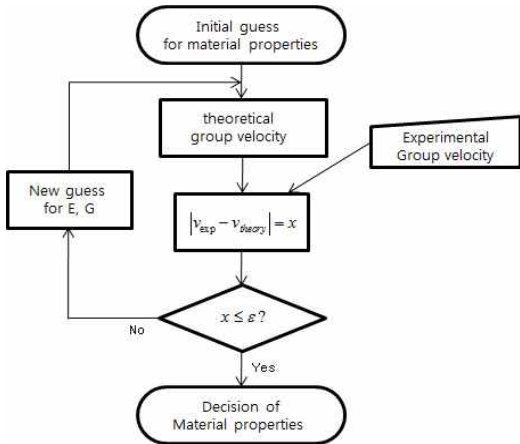


Fig. 2 Flow chart of the optimization process

의 탄성계수로 결정한다. 이와 같이 최적화 과정을 거쳐 최종적으로 박판의 탄성계수를 결정하며, 이때 사용된 목적함수는 식(4)와 같다.

$$f = w \sum_{i=1}^{N_s} \frac{(v_{s,i}^{exp} - v_{s,i}^{cal})^2}{N_s} + (1-w) \sum_{i=1}^{N_a} \frac{(v_{a,i}^{exp} - v_{a,i}^{cal})^2}{N_a} \quad (4)$$

이때 같은 과정을 반복하는데 계산을 빠르게 하기 위해 민감도(sensitivity)를 이용하며 최적화 과정은 Matlab의 fmincon 함수가 사용되었다.

3. 유도초음파 속도 측정

본 연구에서 시험편으로는 두께 50 μm, 순도 99%의 니켈 박판이 사용되었다. 박판의 물성평가를 위해서는 측정 불확도를 줄이는 것이 매우 중요하다. 즉 유도초음파 속도를 측정할 경우 표면에 존재하는 미세한 흠집이나 제조 과정에서 발생하는 두께 차이에 의해서 결과가 달라진다. 또한 반복 실험에 따라 시험편이 찌그러지는 현상도 보일 수 있어 실험결과의 불확도가 크게 높아질 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 다양한 요인에 의해 발생하는 불확도를 최소화하기 위해 시험편의 변형을 최소화하고 동일한 위치에서 초음파의 속도를 반복적으로 측정하기 위한 지지대를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 시험편과 코일을 고정시켜 매 실험 시 위치가 변경됨으로써 발생하는 오차를 줄일 수 있었으며, 자석의 위치에 따른 자속밀도의 변화를 최소화하기 위하여 코일 크기와 유사한 크기의 영구자석을 사용하였다.

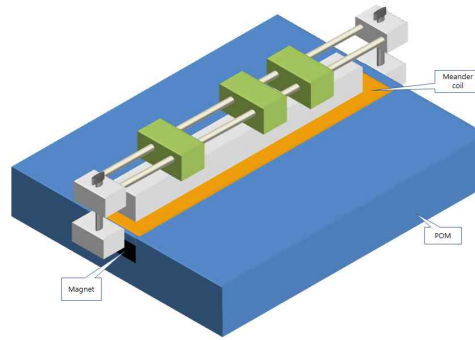


Fig. 3 Schematic for material property measuring apparatus



Fig. 4 Fabricated meander coil

또한 영구자석에 의한 시험편의 변형을 방지하기 위하여 영구자석을 폴리아세탈 판 내부에 삽입하여 시험편이 항상 평평한 상태에서 속도 측정이 이루어지도록 하였다. Fig. 4는 실험을 위해 제작된 송신부와 수신부가 일체형인 연성 PCB (printed circuit board) 미연더 코일로써 여러 개의 수신코일 이 등 간격으로 제작되어 측정된 초음파 전파 시간으로부터 상대적으로 정확한 군속도의 계산이 가능하다. 미연더 코일은 0.4 mm에서 0.8 mm까지 0.1 mm 간격으로 5가지의 파장에 맞는 주파수 대역으로 각 모드 별로 사용되었으며 S0 모드 측정 시에는 100 mm 떨어진 두 수신코일의 신호를 이용하여 군속도를 측정 하였으나, A0 모드의 경우에는 높은 분산성으로 인해 신호 감쇠가 크므로 60 mm 간격으로 제작된 두 수신 코일에서 측정된 신호로 군속도를 측정하였다. ω (angular frequency)-k(wavenumber) 선도에서 결정된 주파수는 임피던스 정합(impedance matching)을 통해 장비와 센서 사이의 임피던스 차이를 보정하였다.

Fig. 5는 실험에 사용된 코일의 파장에 따라 선택된 주파수 결과이다. 측정 장치로는 RAM-5000 (RITEC)을 사용하였으며 전체적인 구성은 Fig. 6과 같다. Fig. 5에서 설계된 코일의 파장에 맞는 중심주파수의 tone-burst 신호를 송신 코일에 추가하였다. 이때 처음 분산선도로 구해진 중심주파수는 임의의 물성값을 예측하여 입력한 값이기 때문에 정확한 군속도의 측정을 위해 실험

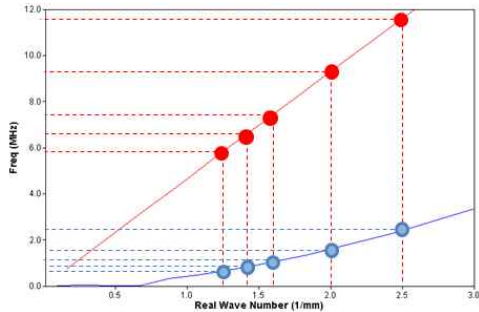


Fig. 5 Determination of the center frequency according to the selected wavenumber of meander-coil

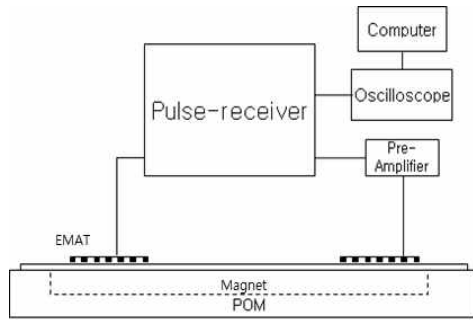


Fig. 6 Schematic of EMAT generated Lamb wave system

에 사용된 시편에 맞는 중심주파수를 실험적으로 측정하여 그 값을 사용하였다. 수신측은 동일한 RAM-5000 장비를 이용하였으며, 신호의 확인은 디지털 오실로스코프를 사용하였다.

4. 결 과

Fig. 7은 EMAT을 이용하여 얻은 원신호를 보여준다. 각 신호는 시간영역에서 20-30번의 평균화(averaging)를 하였으며, 신호 대 잡음비(S/N ratio)가 상당히 높은 신호를 확인할 수 있었다. Fig. 8(a)는 송수신 센서 사이의 거리가 100 mm, (b)는 200 mm일 때 얻어진 신호의 STFT 결과이다. (a)와 (b)의 스펙트로그램에서 에너지가 가장 높은 시간대가 선택되어 계산에 이용된다. 두 시간의 차이와 송신 센서 사이 거리인 100 mm로부터 군속도는 계산되어 지며, 이 때 얻어진 실험 값을 최적화 알고리즘에 입력하면 Fig. 9와 같이 실험으로 측정된 결과와 일치하는 주파수 범위를 가지는 분산선도를 얻을 수 있다. 이 분산선도는

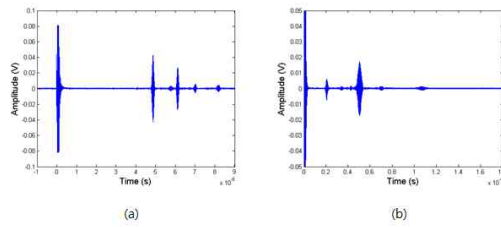


Fig. 7 Raw signal of S0 mode (a) and A0 mode (b) generated by EMAT

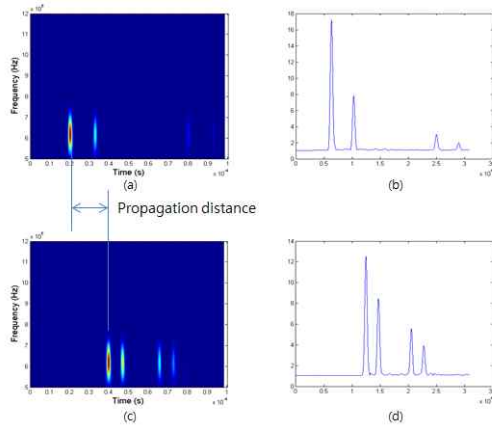


Fig. 8 STFT results of time difference and magnitude between 100 mm distance of the transmitter-receiver(a),(b) and 200 mm distance(c),(d)

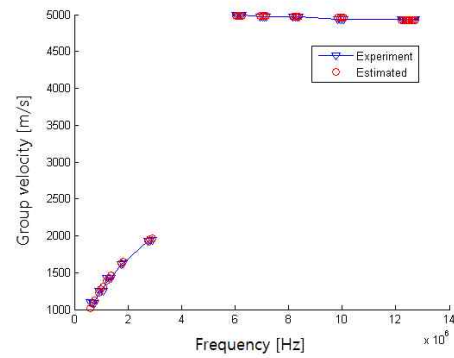


Fig. 9 The results of the optimization process using group velocity of S0 mode and A0 mode

모든 실험값을 만족해야 하기 때문에 실험값이 많을수록 더욱 안정적인 결과를 도출해 낼 수 있다.

불확도를 줄이기 위해 각 주파수에 대해 10번의 반복 실험을 수행하였다. 이 값의 평균을 이용하여 최적화 처리를 하였는데 S0 모드와 A0 모드를 각각 사용했을 경우와 S0와 A0 모드를 함께 사용한 결과를 비교하였다(Table 2). S0와 A0의 두 가지 모드를 최적화에 적용하여 측정된

Table 2 The results of the optimization using guided waves (GPa)

Optimization result	S0 mode	E	202.4
		G	78.2
		v	0.294
	A0 mode	E	195.5
		G	73.0
		v	0.339
	S0 + A0	E	201.6
		G	77.4
		v	0.302

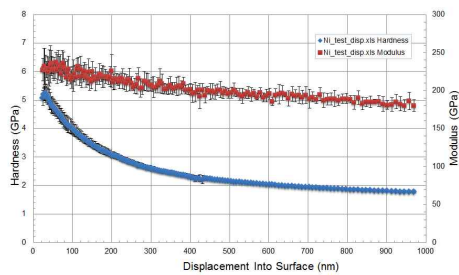


Fig. 10 Young's modulus and hardness on nickel by nano-indentation

Table 3 Comparison of the results obtained by the optimization, nano-indentation and literature value (GPa)

	Optimization results	Nano-indentation	Literature value
E	201.6	207.0	203.7
G	77.4	-	77.8
v	0.302	-	0.309

탄성계수를 S0 또는 A0중 하나의 모드만을 최적화에 적용하여 측정된 탄성계수와 비교하면 중간값을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이는 S0 모드의 경우 영률에, A0 모드의 경우 전단계수 평가에 더 많은 영향을 미치기 때문이다[6]. 그러므로 유도초음파를 이용하여 탄성계수를 평가하고자 할 경우 정밀정확도의 향상을 위해서는 가급적 여러 모드의 다양한 주파수에서의 군속도 측정 결과를 최적화에 적용하는 것이 효율적이라 판단된다. 본 실험에서 측정된 탄성계수 측정 결과 검증을 위하여 시험편에 대하여 나노압입시험법을 실시하였다.

Fig. 10은 나노압입시험법으로 얻은 경도(hardness)와 영률 측정 결과이며, 표면으로부터 깊어질수

록 영률이 줄어드는 경향을 보인다. 유도초음파를 이용하는 측정법이 두께 방향의 모든 탄성계수의 평균에 해당하므로 나노압입시험법으로부터 얻은 측정값도 깊이 방향에 대하여 평균하여 비교하였다. 그리고 Nondestructive Testing Handbook의 순수 니켈 재료의 탄성계수 측정 결과도 함께 비교하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 유도초음파기반 EMAT을 이용해 구해진 탄성 계수 201.6 GPa과 나노압입시험법으로 구해진 값과 비교하였을 경우 2.6% 이내로 일치하는 결과이다. 문헌값과는 1.03% 내에서 일치하는 결과이다. 이 시험 결과에 의하면 유도초음파기반 EMAT에 의한 탄성계수 값이 신뢰성이 있음을 나타내며 반복 측정시 발생하는 불확도를 줄임으로써 더 좋은 결과를 얻어 낼 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론

본 실험에서는 EMAT으로 송수신 유도초음파의 군속도 측정 결과로부터 박판의 탄성계수를 평가하였으며, 나노압입시험법, 참고문헌에서 제시된 측정값들과 비교하여 영률의 경우 3% 이내에 일치하는 결과를 보였다. 측정된 유도초음파의 군속도는 이론적으로 계산된 군속도와의 비교를 통하여 최적화되었으며 이로부터 영률, 전단계수, 푸아송 비 등의 탄성계수가 평가되었다. 본 연구를 통하여 박판의 탄성계수 평가 절차가 확립될 것이다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 주요사업의 지원과 부산대학교 기계공학부 BK21 사업단 지원으로 연구되었으며, 나노압입시험 결과를 제공해주신 KRISS의 한준희 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Joseph L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press (1999)
 [2] 신현재, "유도초음파를 이용한 비파괴탐상 기법", *비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 3, pp. 238-244 (2000)

- [3] 조윤호, 함효식, 최홍호, "유도초음파에 의한 비균질 적층의 접합층 두께 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 4, pp. 391-397 (2001)
- [4] 조승현, 박재하, 권휴상, 안봉영, 이승석, "관형 구조물 유도초음파 검사를 위한 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈 개발", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 2, pp. 122-129 (2009)
- [5] 주경문, 진석홍, 문용식, "유도초음파기술을 이용한 배관 감육 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 4, pp. 295-301 (2010)
- [6] W. P. Rogers, "Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves," *Res. Nondestr. Eval.*, 6, pp. 185-208 (1995)
- [7] Weimin Gao, Christ Glorieux and Jan Thoen, "Laser ultrasonic study of Lamb waves: determination of the thickness and velocities of a thin plate," *International Journal of Engineering Science*, 41, pp. 219-228 (2003)
- [8] 안봉영, 김영길, 이승석, "EMAT을 이용한 판재의 소성이방성 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 17, No. 4, pp. 270-277 (1997)
- [9] 박익근, 김현묵, 김태형, 김용권, 조용상, 송원준, "박판의 두께감육 평가를 위한 비접촉 유도 초음파 검사 기법", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, No. 4, 287-293 (2005)
- [10] 안봉영, 조승현, 김영주, 김기복, "위상배열 EMAT의 제작 및 특성 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 4, pp. 373-379 (2010)
- [11] 이진혁, 박익근, 김용권, 김대현 "수평회과 송수신용 EMAT를 이용한 스틸 박판의 두께 감육 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 1, pp. 47-52 (2011)
- [12] Graff KF, "Wave Motion in Elastic Solids," Ohio State University Press (1975)
- [13] Farhang Honarva, Esmaeil Enjilela and Anthony N. Sinclair, "An alternative method for plotting dispersion curves," *Ultrasonics*, 49, pp. 15-18 (2009)