

유도초음파의 감쇠계수에 대한 실험적 고찰

Experimental Investigation for the Attenuation Coefficient of Ultrasonic Guided Wave

이동진*, 조윤호**[†], 이준현**, 신동철**

Dong Jin Lee*, Younho Cho**[†], Joon Hyun Lee** and Dong-Chul Shin**

초 록 일반적인 산업현장에서 내부결함 평가를 위해 사용되어온 유도초음파기법은 비결함 지역에서는 에너지 감쇠를 고려하지 않고 적용되어 왔다. 결함 지역에서의 신호는 산란과 반사에 의해서 분명한 감쇠가 발생하지만 비결함 지역에서도 작은 감쇠가 발생한다. 또한 분산선도에서 판파(Lamb wave)는 각 두께, 주파수에 의해 분산성이 달라지기에 각 모드에 적합한 감쇠계수를 찾는 것은 중요하다. 이를 위해 접촉식 PZT(piezoelectric)센서를 이용한 pitch-catch 방식으로 거리에 따른 각 모드의 감쇠계수를 구하였다. 본 연구에서는 흔히 쓰이는 알루미늄과 구리판으로, 두께 차이, 모드 차이, 재질 차이에 의한 실험적인 감쇠율을 구하는데 중점을 두었다. 그 결과 각 변수에 따라 감쇠계수는 달라지며, 정량화가 필요하다는 것을 확인하였다.

주요용어: 판파, 분산선도, PZT센서, 감쇠계수

Abstract In general, ultrasonic guided wave techniques that used for an evaluation of the internal defect have been applied without considering energy loss. It can be found out that the significant attenuation is observed in the signal of structure with defect by the scattering and absorption. Even in the signal acquired from defect-free structure, this attenuation can be also significant. Therefore, it is very essential to determine the Lamb wave propagation characteristics depending on modes because the dispersibility of Lamb wave can be easily influenced by the attenuation effect with frequency and thickness. For this reason, changing the propagation distance, attenuation coefficient of each Lamb wave mode needs to be investigated by the contact pitch-catch method with PZT(piezoelectric) sensors. In this paper, the experimental attenuation coefficient is measured by choosing the following three different variables; mode, thickness and plate materials. As a result, experimental attenuation coefficient is obtained as the function of variables.

Keywords: Lamb Wave, Dispersion Curve, PZT Sensor, Attenuation Coefficient

1. 서 론

전 세계적으로 환경 문제가 심화되고 있다. 그에 맞추어 업계에서는 환경오염을 줄일 수 있는 방법을 찾고 있으며, 이를 위해 환경오염을 일으키는 기존의 에너지를 대체하는 그린에너지가 개발되고

있다. 비파괴기법은 기존의 화석 연료를 이용하는 설비뿐만 아니라 태양열, 지열, 풍력, 조력 등을 이용하는 그린에너지 설비에도 광범위하게 쓰일 수 있는 방법이다. 즉, 에너지원이 달라져도 설비의 보다 안전한 사용을 위해서는 비파괴적인 검사 방법이 무엇보다도 중요하다.

[접수일: 2009. 9. 21, 수정일: 2009. 10. 13, 게재확정일: 2009. 10. 15] *부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 기계공학부, [†]Corresponding Author: Wave and Structural Health Monitoring Lab., School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea, (E-mail: mechcyh@pusan.ac.kr)

판파는 판 구조물의 결함검사 시 가장 많이 쓰이는 초음파 중의 하나이다. 재료의 전 두께를 통하여 전달되기에 매우 유용할 뿐만 아니라 사용하기도 상당히 간단하기 때문에 단일재료, 복합재료나 복잡한 형상의 구조체의 결함 검출 시에도 용이하다. 판파 사용에는 여러 가지 장점이 있지만 그중 대표적인 것은 기존의 종파나 횡파에 비해 상대적으로 에너지 감쇠없이 아주 먼 거리까지 탐사 가능하다는 점이다. 판파는 구조체 외부에 설치된 절연물질이나 단열재에 관계없이 검사를 진행할 수 있으며 기존의 초음파시험기법으로는 접근이 어려운 부위에 대한 검사가 가능하다. 또한 판파에는 S0, S1 등의 다양한 대칭 모드(symmetric mode)와 A0, A1 등의 비대칭 모드(antisymmetric mode)가 존재하기에 상황에 맞는 적합한 모드를 이용하여 최적의 결과를 얻을 수 있다. 그리고 원하는대로 파장 조절을 할 수 있어, 결함 크기에 관계없이 탐지 가능하다는 점이다. 마지막으로 판파는 plate의 내부에 걸쳐 진행하기 때문에 외부의 영향을 크게 받지 않는다는 장점이 있다[1]. 하지만 매질 내를 진행할 때 굴절, 흡수와 산란 등은 매질과의 상호작용 결과 발생하며 에너지 감쇠가 발생한다. 이것을 초음파 감쇠라고 하는데 초음파의 주파수와 밀접한 관계를 가지며 주파수가 높아질수록 감쇠가 높아진다. 감쇠는 단위진행 당 감쇠를 나타내며 진행거리는 초음파 감쇠에 영향을 미치는 가장 큰 요인이다. 지금까지의 연구 결과를 살펴보았을 때 수치해석에 의한 에너지 감쇠 예측[2]이나 복잡한 구조물의 접착, 결합부에서의 초음파 에너지 손실에 의한 감쇠[3] 그리고 주변의 액체, 고체에 의한 종파 또는 횡파의 감쇠에 관한 연구[4]를 주로 하였다. 또한 분광기(spectroscopic)를 사용하여 초음파 감쇠를 측정하였다[5]. 지금까지 판파의 개별 모드에 따른 에너지 감쇠는 거의 다루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 판파의 각 모드에서의 에너지 감쇠를 접촉식 PZT센서를 이용하여 측정하고 감쇠계수의 정량화를 목적으로 실험을 진행하였다.

2. 배경이론

2.1. 판파(Lamb Wave)의 전파

판파(plate wave, Lamb wave)는 재료의 비파괴 검사에 이용되는 초음파의 또 다른 형태로 램파라



Fig. 1 Coordinate system for a free plate

고도 불린다. 1917년 처음으로 제안한 연구자의 이름을 따서 만든 이 파는 몇 파장 정도의 두께를 갖는 금속 내에 존재하는데, 재료의 전 두께를 통하여 진행되는 복합된 진동형태로 구성되기 때문에 박판의 결함 검출에 사용된다. 판파의 진동양식 특성은 밀도, 금속의 탄성특성과 구조, 금속시편의 두께 및 주파수의 영향을 받는다. 판파는 대칭모드(또는 팽창형)와 비대칭모드(또는 굽힘형)의 2종류가 있다. Fig. 1의 두께 d의 평판에서 램파가 양의 x방향으로 전파한다면 symmetry와 anisymmetry 파에 대한 Rayleigh-Lamb frequency식을 얻을 수 있다[1].

$$\frac{\tan(\beta d/2)}{\tan(\alpha d/2)} = -\frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \tag{1}$$

$$\frac{\tan(\beta d/2)}{\tan(\alpha d/2)} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4\alpha\beta k^2} \tag{2}$$

여기서,

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \tag{3}$$

$$\beta^2 = \frac{\omega^2}{c_t^2} - k^2 \tag{4}$$

식 (1)은 램파의 symmetric 모드이고, (2)는 antisymmetric 모드이다. 분산선도에 의해 PZT센서의 적당한 각도와 초음파 속도를 확인할 수 있다.

2.2. 초음파 감쇠

초음파가 매질 내를 이동하면서 끊임없이 변화가 일어나는데, 지속적으로 약해지는 현상인 감쇠는 매우 중요하다. 초음파는 더 멀리 전파되어 가면 갈수록 약해지며 이는 파장, 매질의 종류와 밀도, 조직의 이질성, 조직내 반사면의 종류 및 수 등과 관계가 있다. 감쇠는 주로 반사, 굴절, 흡수 및 산란 과정을 통해 일어난다. 시편의 겉이나 내부에 결함이 존재하지 않더라도 눈에 보이지 않는 조직

간의 이질성으로 인해 거리가 늘어날수록 감쇠를 발생시킨다. 댐핑효과에 의해서 감쇠가 발생하는데, 지배 방정식과 변위의 조합으로 인해 u 의 방정식으로 만들 수 있다.

$$u = Ae^{(-\alpha x)} \cdot e^{i(k_r x - \omega t)} \quad (5)$$

여기서, 앞의 항은 감쇠에 관한 항이고 뒤의 항은 파의 움직임에 대한 항이다. 이것을 간단하게 표현한 식은 다음과 같다[1].

$$A_x = A_0 \exp[-\alpha_0 x] \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{x} 20 \log_{10} \frac{A_0}{A_x} \quad (7)$$

Fig. 2는 감쇠가 일어나는 단순한 도식이다. A_0 는 이전에 발생한 초음파 크기, x 는 초음파의 전파거리, A_x 는 거리 x 만큼 전파후의 초음파 크기이다. 이 때 α_0 를 감쇠계수(attenuation coefficient)라고 부르고 단위는 dB/mm로 표시한다.

3. 재료 및 실험 방법

3.1. 시험편

본 연구에서는 1050계열의 알루미늄과 일반 구리의 두 개의 시험편이 사용되었다. 가로 × 세로 × 두께는 각각 200 mm × 500 mm × 0.6 mm와 200 mm × 500 mm × 1 mm 2개씩 사용되었다. 결함은 없고 표면의 손상이 거의 없는 시험편이다.

3.2. 실험 방법

실험 방법은 매우 간단하다. 우선 일정한 정현파를 입력하기 위해 RPR-4000 Pulser/Receiver를 이용하였다. 공진 주파수(nominal resonant frequency) 2 MHz를 가지는 variable angle transducer를 수신, 송신센서로 사용하였다. 센서와 시험편 사이에는 ultrasonic couplant(ultrage12)를 사용하였고, 수신된 신호 확인은 디지털 오실로스코프(Wavesurfer 42Xs)를 이용하였다.

Fig. 3은 연구에서 사용된 접촉식 PZT센서의 송수신 방법을 나타낸 것으로 센서 사이의 거리를 0 mm에서 200 mm까지 변화시키면서 pitch-catch

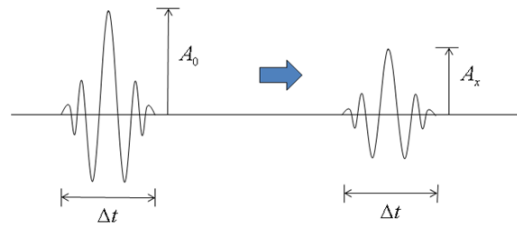


Fig. 2 Schematic of attenuation process

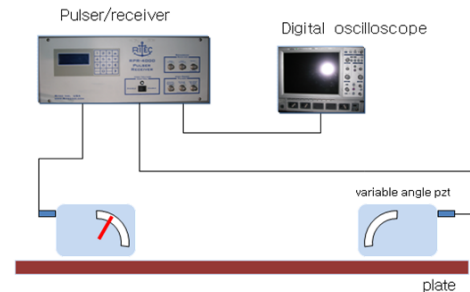


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

방법[6]을 이용하여 각 지점의 amplitude를 측정하였다. 분산선도의 위상속도를 분석하여 PZT센서의 최대수신각을 알 수 있고, 균속도로 모드의 위치를 확인할 수 있다. 수신된 신호는 초음파 분석 프로그램을 통해 FFT과정을 거쳐 신호분석을 하였다.

4. 실험 결과

4.1. 재질 변화에 따른 감쇠계수 비교

Fig. 4는 pitch-catch 기법으로 얻은 알루미늄과 구리 시험편에서의 A0모드의 원신호 비교이고 Fig. 6은 S0모드에서의 비교이다. 각 모드에서 FFT결과를 보면 공진주파수에 맞는 2 MHz를 확인할 수 있었고, 각각 이론치의 위치에 맞는 amplitude를 확인할 수 있었다. 수신부와 송신부 사이의 거리가 멀어짐에 따라 Fig. 5와 같이 감쇠가 일어나면서 2차 곡선이나 1차 곡선과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 6, 8, 11, 13은 다른 조건은 고정시키고 재질만 변경시켜 비교한 감쇠 계수이다. 이 값은 측정된 실험치를 curve fitting에 의해 가장 근접한 함수식을 구한 것이다. 이 값은 약간의 오차를 포함했으며, 이를 줄이기 위해 반복적인 실험을 행하였다. 식 (6)에 의해서 α 값이 구해졌다. 반복적인 실험에 의한 amplitude의 표준편차는 에러바(error

bar)를 이용해 표시하였다. 감쇠 계수는 같은 모드, 같은 두께에서도 매질 차이(종류, 밀도, 조직의 이질성, 조직 내 반사면의 종류와 수 등)에 의해 감쇠 계수가 큰 차이를 보인다.

0.6 mm 알루미늄과 구리 시편의 S0 모드 웨이브 폼 비교는 Fig. 9이고, 구해진 amplitude는 Fig. 10, 12에 나타내었고, 커브 피팅에 의해서 알맞은 감쇠 계수 값을 구할 수 있었다.

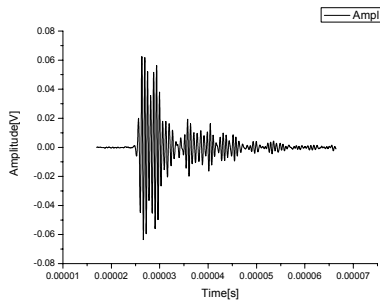
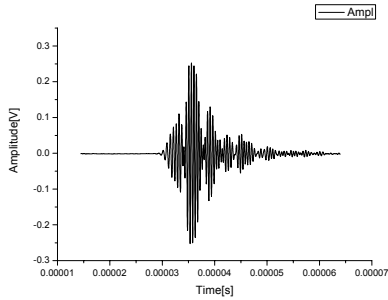


Fig. 4 Ultrasonic waveform of A0 mode at 0.6 mm Al and Cu plate

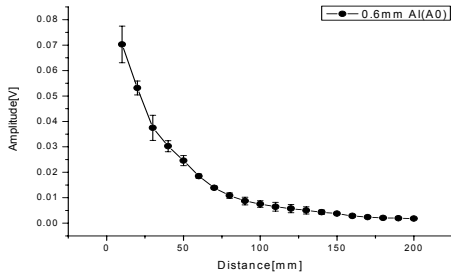


Fig. 5 Amplitude change according to distance of A0 mode in 0.6 mm Al plate

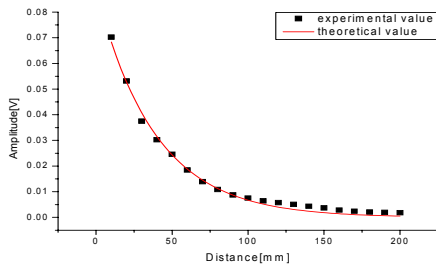


Fig. 6 Curve fitting result of A0 mode in 0.6 mm Al plate

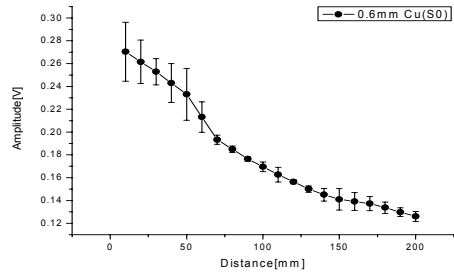


Fig. 7 Amplitude change according to distance of A0 mode in 0.6 mm Cu plate

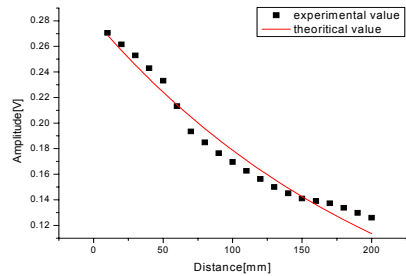


Fig. 8 Curve fitting result of A0 mode in 0.6 mm Cu plate

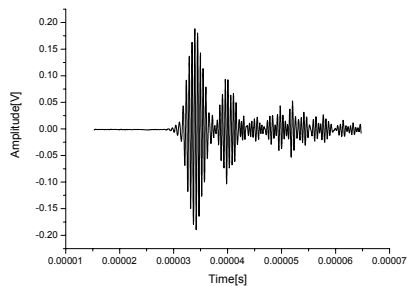
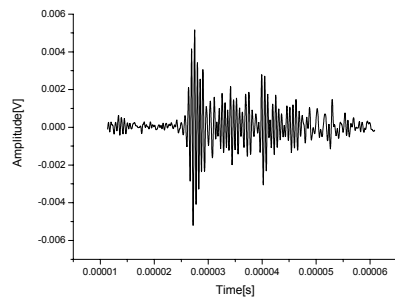


Fig. 9 Ultrasonic waveform of S0 mode in 0.6 mm Al and Cu plate

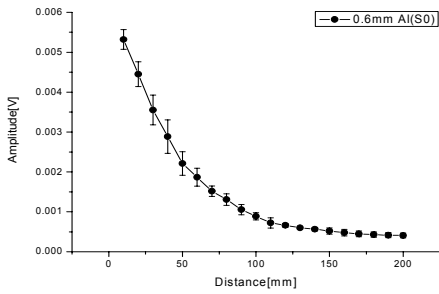


Fig. 10 Amplitude change according to distance of S0 mode in 0.6 mm Al plate

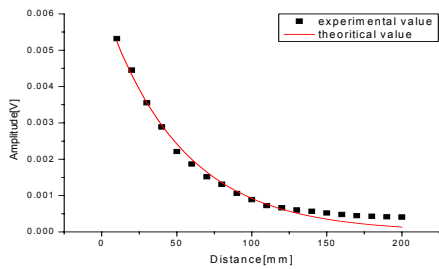


Fig. 11 Curve fitting result of S0 mode in 0.6 mm Al plate

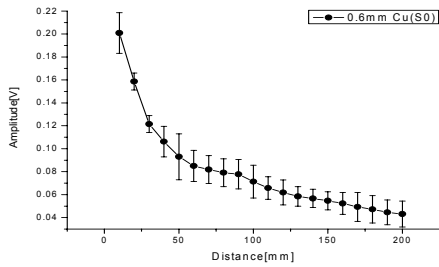


Fig. 12 Amplitude change according to distance of S0 mode in 0.6 mm Cu plate

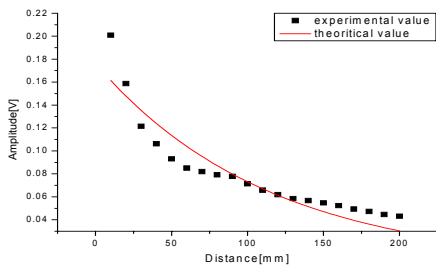


Fig. 13 Curve fitting result of S0 mode in 0.6 mm Cu plate

Table 1 Attenuation coefficient with respect to the material

0.6 mm , S0 mode		
material	Al	Cu
α	0.01931 ± 0.00067	0.0088 ± 0.00084
0.6 mm, A0 mode		
material	Al	Cu
α	0.02577 ± 0.00074	0.00453 ± 0.00019

Table 1과 같이 감쇠계수 α 는 다른 조건을 고정시키고 시편의 재질만 변화시켰을 경우, 상당한 차이를 보였다. 0.6 mm 두께에서 S0 모드를 비교했을 때, 알루미늄의 감쇠 계수는 구리의 경우와 비교하여 2배 이상 증가한 것이 확인되었고, A0의 경우에는 2배 정도 감소한 것을 볼 수 있었다.

4.2. 모드 변화에 따른 감쇠계수 비교

모드에 따른 변화는 1 mm 두께의 알루미늄과 구리 시편을 이용하여 실험하였다. Fig. 14와 같이 최적 수신각을 정하여 원하는 신호를 얻어내었다. 그리고 Fig. 15, 17, 20, 22는 PZT센서 사이의 거리를 변화시켜 얻어진 amplitude 차이를 나타내었다. 실험 결과

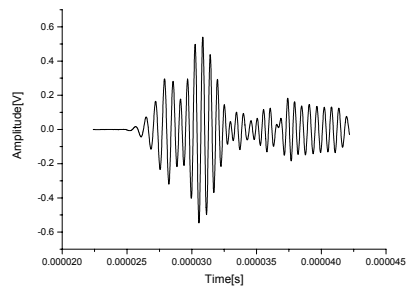
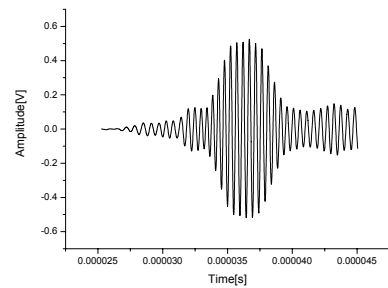


Fig. 14 Ultrasonic waveform S0 and A0 mode in 1 mm Al plate

얻어진 amplitude값은 모드 별로 조금씩 차이가 있었고, 이 실험치를 토대로 얻어진 감쇠 계수 값을 Fig. 16, 18, 21, 23에 나타내었다. 대칭 모드와 비대칭 모드에 따른 감쇠 계수의 결과는 다르게 나왔고 Table 2와 같다.

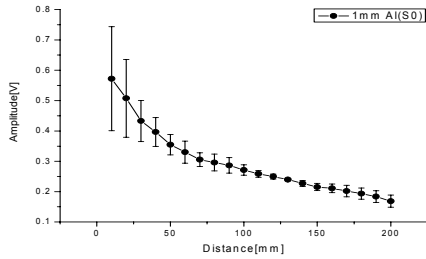


Fig. 15 Amplitude change according to distance of S0 mode in 1 mm Al plate

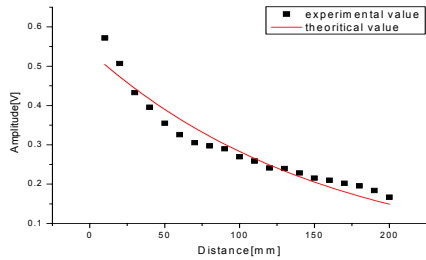


Fig. 16 Curve fitting result of S0 mode in 1 mm Al plate

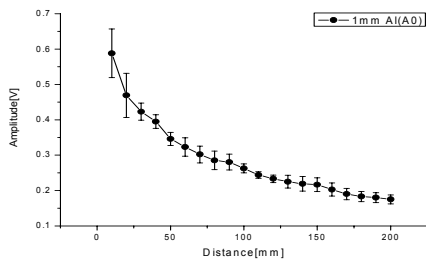


Fig. 17 Amplitude change according to distance of A0 mode in 1 mm Al plate

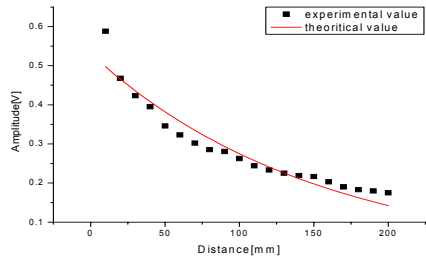


Fig. 18 Curve fitting result of A0 mode in 1 mm Al plate

Fig. 19는 1 mm 구리 시편에서 얻은 파형으로써 각각 S0와 A0모드를 나타낸다. 그리고 위와 동일하게 거리에 따른 amplitude 변화량과 감쇠 계수를 나타내었다.

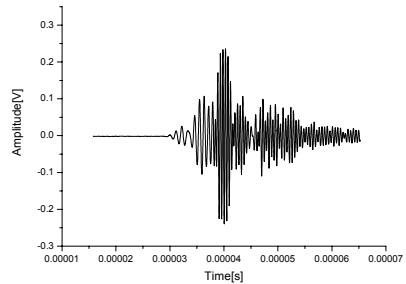
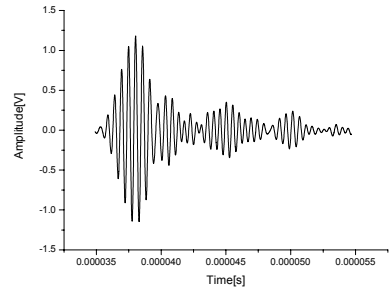


Fig. 19 Ultrasonic waveform of S0 and A0 mode in 1 mm Cu plate

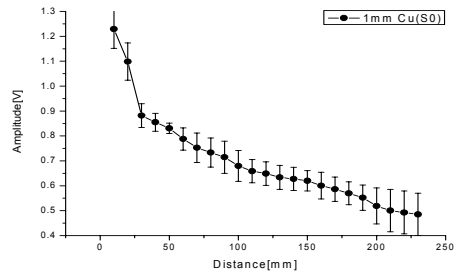


Fig. 20 Amplitude change according to distance of S0 mode in 1 mm Cu plate

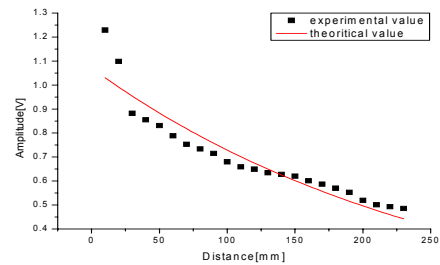


Fig. 21 Curve fitting result of S0 mode in 1 mm Cu plate

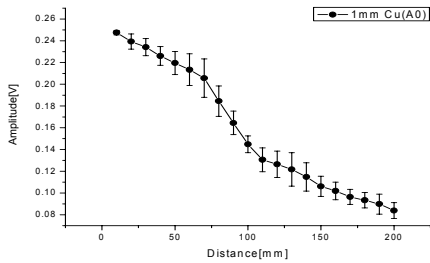


Fig. 22 Amplitude change according to distance of A0 mode in 1 mm Cu plate

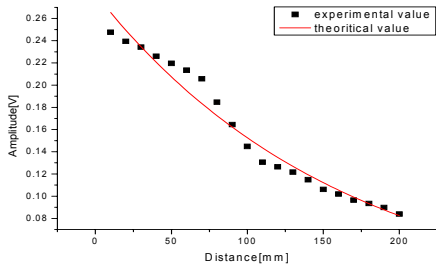


Fig. 23 Curve fitting result of A0 mode in 1 mm Cu plate

Table 2 Attenuation coefficient with respect to the mode

1 mm , Al plate		
mode	S0	A0
α	0.00642±0.0004	0.00658±0.00046
1 mm, Cu plate		
mode	S0	A0
α	0.00385±0.00031	0.00615±0.00028

Table 2의 결과로 보아, 알루미늄 시편의 경우는 감쇠 계수의 차이가 0.6 mm일 경우에도 크지 않았으며, 1 mm 시편은 거의 없는 것이 확인되었다. 알루미늄 판에서 모드 별로 감쇠 계수의 차이는 크지 않았으나, 구리는 2배 정도의 차이를 확인할 수 있었다. 이것은 비대칭 모드(A0)와 대칭 모드(S0)는 운동 방향이 각각 다르고 각 모드의 위상 속도 또한 달라지기 때문에, 각 매질 내에서 반사, 굴절되는 방향과 양이 달라짐에 의해 그 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

4.3. 시편 두께 변화에 따른 감쇠계수 비교

Table 3은 앞의 실험 4.1과 4.2의 결과를 토대로 0.6 mm와 1 mm의 시편 두께 차이에 의한 비교이

Table 3 Attenuation coefficient with respect to the mode

S0 mode , Al plate		
thickness	0.6mm	1mm
α	0.01931±0.00067	0.00642±0.0004
A0 mode , Al plate		
thickness	0.6mm	1mm
α	0.02577±0.00074	0.00658±0.00046
S0 mode , Cu plate		
thickness	0.6mm	1mm
α	0.0088±0.00084	0.00385±0.00031
A0 mode , Cu plate		
thickness	0.6mm	1mm
α	0.00453±0.00019	0.00615±0.00028

다. 이것 역시 모드나 시편 재질 차이와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 다시 말해, 모든 조건을 동일하게 두고 단지 두께만 변화시켰을 경우도 감쇠 계수의 크기는 변했으며, 모드 차이나 재질 차이에 비해 그 차이가 큰 것을 확인하였다.

이 결과는 감쇠 계수에 영향을 주는 요인인 매질의 밀도 차이에 인한 것으로 두께 변화는 감쇠 계수 변화의 중요 인자라는 것을 확인하였다. 또한 이것은 비파괴 검사 시에 정밀도에 영향을 미칠 만큼 큰 차이를 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Lamb wave를 이용한 박판에서 감쇠 계수를 검출하고자 하였다. 처음 예상한대로 변수로 둔 재질 차이, 모드 변화, 시편의 두께 변화에 따라 정도의 차이는 있지만 감쇠 계수가 모두 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 토대로 판파에서 각 모드에 따른 감쇠 계수를 구하는 것은 매우 중요하며 꼭 필요한 연구라는 것을 확인할 수 있었다. 램파의 분산선도를 볼 때, 분산성의 유무에 의해서도 감쇠 계수의 차이가 발생한다고 예상되기에 차후 계속적인 실험을 통해 데이터를 충분히 확보한다면 감쇠 계수의 정량화로 인하여 감쇠분산선도 작성이 가능할 것이라 생각된다. 그리고 평판뿐만 아니라 배판이나 복합재료, 복잡한 구조물 내의 유도초음파 모드별 감쇠 계수의 변화를 비교, 분석하여 향후 비선형 연구 및 분산적 특성을 갖는 진단 연구의 신호 교정 자료의 기초를 제공할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2009년에서 2011년 사이 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)와 부산대학교 기계공학부 BK21사업단의 연구비 지원으로 수행되었기에 이에 감사를 표한다.

참고문헌

- [1] Joseph L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge (1999)
- [2] W. J. Staszewski, B. C. Lee, L. Mallet and F. Scarpa, "Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing," *Smart Mater. Struct.* 13, pp. 251-260 (2004)
- [3] Y. Cui and D. H. Zou, "Numerical simulation of attenuation and group velocity of guided ultrasonic wave in grouted rock bolts," *Journal of Applied Geophysics* 59, pp. 337-344 (2006)
- [4] R. Long, M. Lowe and P. Cawley, "Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes," *Ultrasonics* 41, pp. 509-519 (2003)
- [5] Patricia Mougín, Derek Wilkinson and Kevin J. Roberts, "In situ ultrasonic attenuation spectroscopic study of the dynamic evolution of particle size during solution-phase crystallization of urea," *Crystal Growth& Design*, Vol. 3, No. 1, pp. 67-72 (2003)
- [6] Seung-Joon Lee, Joon-Hyun Lee and Joon-Hyung Byun, "Development of 2-dimensional internal defect imaging technique in carbon steel pipe using laser-based ultrasound," *Proceedings of the KSNT Fall Conference*, pp. 43-50, Seoul, Korea (2007)