

유도초음파에 의한 비균질 적층의 접합층두께 평가

Thickness Assessment of Adhesive Layer in Inhomogeneous Layer by Guided Wave

조윤호*, 함효식**, 최홍호***

Younho Cho*, Hyo-sik Ham** and Heung Ho Choi***

초 록 비균질 적층 구조물에서의 유도초음파 전파는 이론적 분산성에 기초하여 실험적으로 규명된다. 이는 입사각도와 주파수의 적절한 선택은 적층 구조물에서의 유도초음파 발생에 중요하다는 것을 드러낸다. 이론적 분산성은 접착층 두께와 층 두께, 물성치에 크게 의존한다. 실험적으로 분산성의 변화를 관찰하므로 비균질 적층 구조물의 접착층 두께를 측정하는 것이 가능하였다.

주요용어: 유도초음파, 비균질 적층 구조물, 분산성, 입사각도와 주파수, 접착층

Abstract: The guided wave propagation in inhomogeneous multi-layered structures is experimentally explored based on theoretical dispersion curves. It turns out that proper selection of incident angle and frequency is critical for guided wave generation in multi-layered structures. Theoretical dispersion curves greatly depend on adhesive zone thickness, layer thickness and material properties. It was possible to determine the adhesive zone thickness of an inhomogeneous multi-layered structure by monitoring experimentally the change of dispersion curves.

Keywords: guided wave, inhomogeneous multi-layered structure, dispersion curve, incident angle and frequency, adhesive zone

1. 서 론

각종 기계설비 및 구조물에서부터, 전자제품의 마이크로 칩에 이르기까지 모든 산업설비와 생산품들은, 접합, 코팅 등에 의해 각 부위가 다양한 형태의 적층 구조물을 이루고 있다. 따라서, 이 같은 적층 구조물 접합부위의 건전성 확보는 많은 기계공학문제에서, 산업설비의 안전성과 고품질 유지를 위해 필수적이다. 박판으로 이루어진 비균질(inhomogeneous) 적층구조물에 대한 초음파나 음향방출법과 같은 각종 비파괴 평가 연구시에는 균질(homogeneous)

단일 판재내의 램파(Lamb wave)와는 다른 형태의 유도초음파가 나타나게 되며, 이에 대한 연구는, 최근들어 국내외적으로 많은 관심을 불러일으키고 있으나, 아직 그 확고한 연구 기반이 확립되지 않은 상태이다[1-5].

비균질 박판 구조물 판재내에서 생성되는 유도초음파는 벌크(bulk)파와는 달리 입사각도, 가진 주파수, 판재의 재질과 두께, 접합층의 두께에 민감하게 반응하는 분산적인 성질이 있어서 이론적으로 해석하기가 난해하다[1-5].

본 연구의 목적은 비균질 적층 구조물에서의 유도초음파의 분산성을 이론에 기초하여 이를 실험적으로 규명하

는데 있다. 물성치가 다른 에폭시(epoxy)를 사용하여 접합층의 두께를 각기 0.147mm, 0.285mm, 0.4mm로 제작한 적층 구조물내에 거동하는 유도초음파를 이론과 실험적으로 해석하였다. 비균질 적층 구조물에서 접합층의 두께에 따라 유도초음파의 가진성이 민감하게 영향을 받음을 관찰하였고, 이를 통해, 유도초음파를 이용한 비균질 적층 판재내의 접합층 두께 측정이 가능함을 제시하였다.

분산선도를 기초로 입사각도와 주파수를 변화 시키면서, 최적의 유도초음파 가진조건을 관찰하고, Snell의 법칙을 이용해 이론적으로 구한 최적의 입사각도와 비교 검증하였다. 입사각도를 바꿔 주기 위해서 자체적으로 설계, 제작한 가변각 켈지(variable angle beam wedge)를 사용하였다.

2. 비균질 적층구조물내 유도초음파 전파이론

2.1. 전파이론

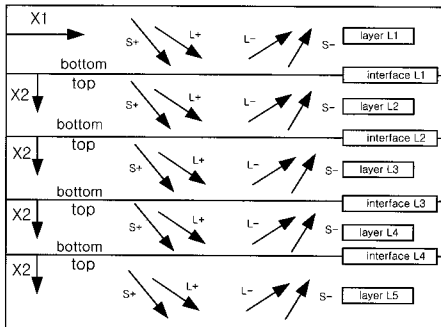


Fig. 1 Plate wave generation in a multi-layered plate, (L=longitudinal wave, S=shear wave)

Fig. 1에서와 같이 적층 구조물내의 각층에는 모드변환에 의해 아래로 진행하는 종파와 횡파 (L+, S+) 및 위로 진행하는 종파와 횡파(L-, S-)와 같은 4개의 벌크파가 발생된다. 적층내의 각 경계면에 윗층과 아랫층의 변위와 표면력(traction) 연속조건을, 적층 외부의 상하면에 자유표면 경계 조건을 적용하여 탄성동역학(elastodynamic) 경계치 문제를 풀게되면 이론적인 분산선도를 얻을 수 있다. 비균질 적층 구조물의 경우에는 각층의 물성치, 즉 종파 및 횡파 속도와 밀도를 대입하여 이론적인 해를 구하게 된다[2,4].

2.2. 유도초음파의 이론적인 입사각도 결정

유도초음파는 판재에 벌크형 초음파를 경사 입사시켜

중으로써 가진 시킬 수 있으며, 보통의 수직접촉식 탐촉자로 벌크형 초음파를 경사입사 시켜주기 위해서는 중간 보조기구인 켈지를 사용해 경사 입사각을 만들어 주게 된다. 판재의 각 재질과 두께에 따라 해당 입사각도는 식 (1)의 스넬(Snell)의 법칙[9]을 통해 얻어진다.

$$\frac{V_1}{\sin \alpha} = \frac{V_2}{\sin \beta} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V₁은 켈지의 재질인 아크릴에서의 종파전파 속도(2.7mm/μsec)이고, V₂는 분산선도상에서 얻어진 특정 모드의 위상속도(phase velocity)이다. 판재내의 굴절각도(β)는 90° 이므로 이 세 값을 이용해 우리가 원하는 유도초음파 모드를 적층 박판구조물내에 가진 시킬 수 있는 이론 입사각도 α를 구할 수 있다.

2.3. 분산선도(Dispersion Curve)

Fig. 2는 단일 알루미늄 판재에 대한 위상속도 분산선도(phase velocity dispersion curve)이고, Fig. 3은 군속도 분산선도(group velocity dispersion curve)이다. Figs. 4-6은 에폭시 dp460을 이용하여 만든 비균질 적층 구조물의 위상속도 분산선도이고, Figs. 7-9는 에폭시 dp190을 접착제로 사용하여 만든 비균질 적층 구조물의 위상속도 분산선도이다. Fig. 2에서 제시된, f*d(가진 주파수와 다층구조물의 전체두께)값에 따른 위상속도 분산선도는 가진 주파수와 입사각도에 민감한 유도초음파의 가진 조건을 이론적으로 결정하는데 사용되어지고, Fig. 3의 군속도 분산선도는 실제 측정된 파형의 모드를 확인하는데 사용되어진다. 화살표시는 본 연구에서 실험적으로 선택된 분산선도상의 가진 조건을 나타낸다.

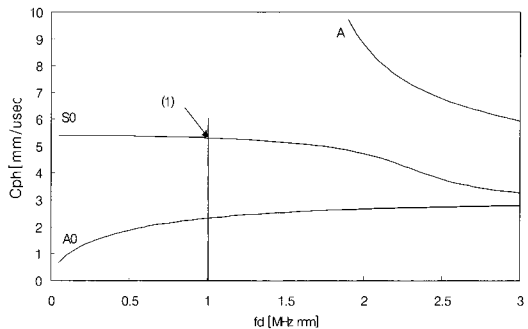


Fig. 2 Phase velocity dispersion curve

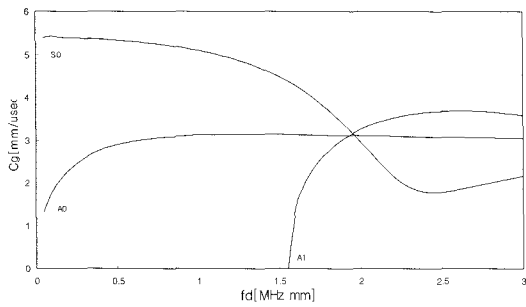


Fig. 3 Group velocity dispersion curve of a single aluminum plate

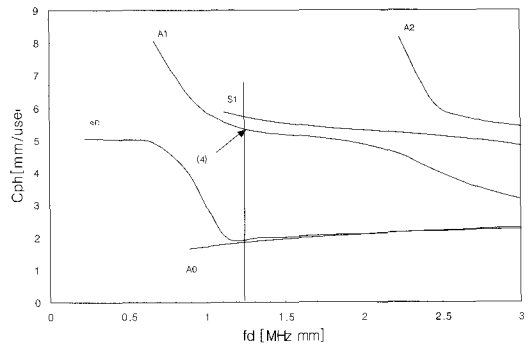


Fig. 6 Phase velocity dispersion curve of A₁(0.5mm)-epoxy: dp460(0.4mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

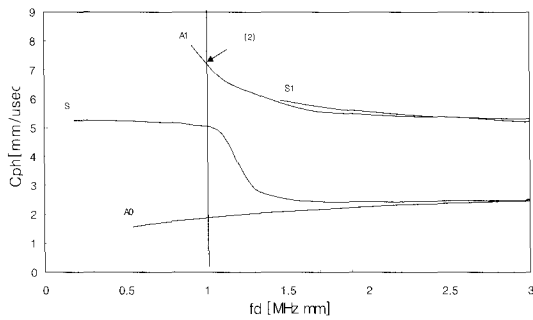


Fig. 4 Phase velocity dispersion curve of A₁(0.5mm)-epoxy: dp460(0.147mm) - A₁(0.5mm) multi-layered plate

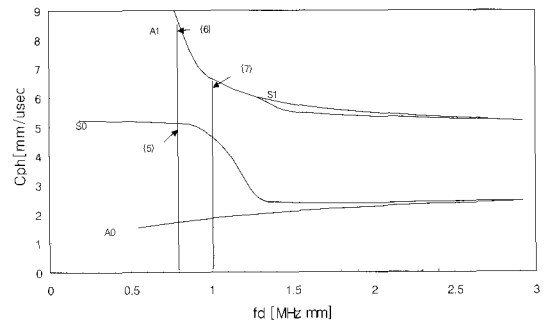


Fig. 7 Phase velocity dispersion curve of A₁(0.5mm)-epoxy: dp190(0.147mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

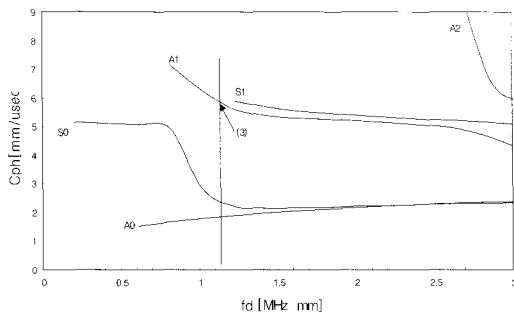


Fig. 5 Phase velocity dispersion curve of A₁(0.5mm)-epoxy: dp460(0.285mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

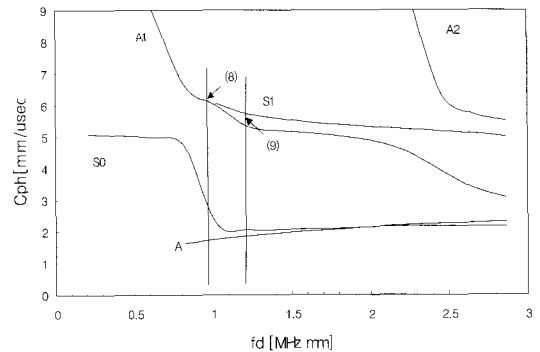


Fig. 8 Phase velocity dispersion curve of A₁(0.5mm)-epoxy: dp190(0.285mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

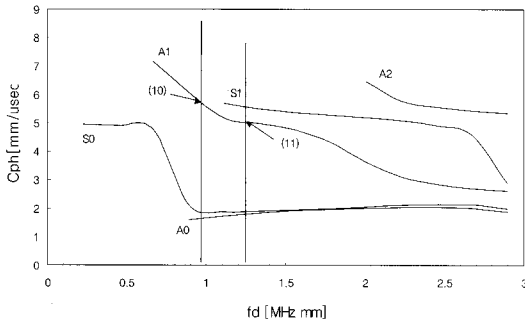


Fig. 9 Phase velocity dispersion curve of $A_1(0.5\text{mm})$ - epoxy: dp190(0.4mm) - $A_1(0.5\text{mm})$ multi-layered plate

3. 비균질 적층 구조물에서의 유도초음파 가진 실험

3.1. 실험장비 설명

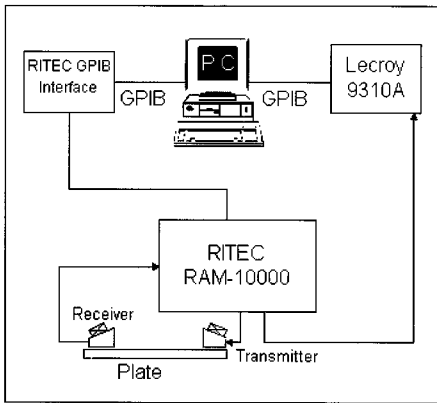


Fig. 10 A schematic of experimental setup

두께가 0.5mm인 A_1 6061 판재 사이에 에폭시 dp460(종파속도=2.323mm/μsec, 횡파속도=1.1615mm/μsec, 밀도=1.1257g/cm³)과 에폭시 dp190(종파속도=1.917mm/μsec, 횡파속도=0.9587mm/μsec, 밀도=1.3715g/cm³)을 접합층에 삽입하여, 접합층-두께가 각각 0.147mm, 0.285mm, 0.4mm인 비균질 적층구조물 시편을 제작하였다. 사용된 에폭시의 물성치는 적층시편을 제작할 때와 동일한 압력 및 온도 조건하에서 경화시킨뒤 실험적으로 측정하였다. 또한 접합층의 두께를 전체시편의 길이방향으로 균일하게 유지하기 위하여 시편제작시, 해당 두께의 직경을 갖는 낚시줄을 적층내에 삽입하였으며, 낚시줄의 직경은 사용된 판재 모드

의 파장에 비해 산란(scattering)효과를 무시할 수 있을 정도로 충분히 작음을 실험을 통해 확인하였다. 두개의 1MHz 탐촉자를 이용한 pitch-catch 탐상방식으로 유도초음파의 분산성, 즉 접합두께, 입사각도 그리고 주파수 변화에 따르는 민감도를 실험적으로 관찰하였다. 본 실험에 사용한 장치 구성은 Fig.10과 같다.

3.2. 입사각도 변화에 따른 유도초음파 가진성(excitability)의 변화

알루미늄(0.5mm)-epoxy: dp460(0.147mm)-알루미늄(0.5mm)인 비균질 적층 판재에 중심주파수 1MHz 탐촉자의 주파수대역내에서 fd값이 1.0323[MHz mm]에 해당되도록 주파수를 고정하고 입사각도를 변화시키면서 수신되는 신호의 진폭을 관찰하였다. 그 결과 입사각도 22.5° 일 때 최적의 A_1 모드 판파가 비균질 적층 판재내에 가진시킬 수 있음이 입증되었다(Fig. 11참조). 실험적으로 얻은 최적의 입사각도는 Fig.4에서 (2)지점의 A_1 모드 위상속도(7.05 [mm/μsec])를 식(1)에 대입하여 이론적으로 구한 입사각도 22.51° 와 일치하였다.

알루미늄(0.5mm)-epoxy : dp460(0.285mm)-알루미늄(0.5mm) 비균질 적층 판재인 경우, f*d가 1.1567 [MHz mm]지점의 이론 입사각도는 27.8° 이다(Fig.5의 (3)지점). 실험한 결과, 27.5° 에서 최적의 A_1 모드 판파를 가진시킬 수 있었다(Fig. 11참조).

알루미늄(0.5mm)-epoxy: dp460(0.4mm)-알루미늄(0.5mm) 비균질 적층 판재인 경우, 이론 입사각도(Fig.6의 (4)지점)는 30.37° 이고 실험을 수행한 결과, 입사각도 30° 에서 최적의 A_1 모드 판파를 가진시킬 수 있었다. 군속도 분산선도에서 구한 이론적인 A_1 모드의 군속도는 4.062 [mm/μsec]이고, 실험적으로 군속도를 측정된 결과 4.11 [mm/μsec]이었다. 입사각도 30° 로하여 알루미늄(0.5mm)-epoxy: dp460(0.4mm)-알루미늄(0.5mm)인 비균질 적층 판재에 판파를 가진시킬 경우, A_1 모드가 효과적으로 가진됨을 관찰하였다(Fig. 11참조).

알루미늄(0.5mm)-epoxy: dp190(0.147mm)-알루미늄(0.5mm) 비균질 적층 판재인 경우, fd가 0.8[MHz mm]인 지점의 S_0 모드의 위상속도는 5.124 [mm/μsec]이고 이론 입사각도는 31.8° 이다(Fig.7의 (5)지점). A_1 모드 위상속도는 8.6 [mm/μsec]이고 이론 입사각도는 18.3° 이다(Fig.7의 (6)지점). 실험결과, 입사각도 30° 에서 S_0 모드가 가장 효과적으로 가진 된다는 것을 알 수 있었다(Fig. 12참조).

알루미늄(0.5mm)-에폭시: dp190(0.285mm)-알루미늄(0.5mm) 비균질 적층 판재인 경우, 입사각도 25° 에서 A₁ 모드 판파를 가진 시킬 수 있었다(Fig. 12참조). 이 경우의 이론 입사각도는 25.6° 이다(Fig. 8의 (8)지점).

알루미늄(0.5mm)-에폭시: dp190(0.4mm)-알루미늄(0.5mm) 비균질 적층 판재인 경우, 이론 입사각도는 28.3° 이고(Fig. 9의 (10)지점), 실험한 결과 27.5° 에서 최적의 A₁ 모드 판파를 관찰할 수가 있었다(Fig. 12참조).

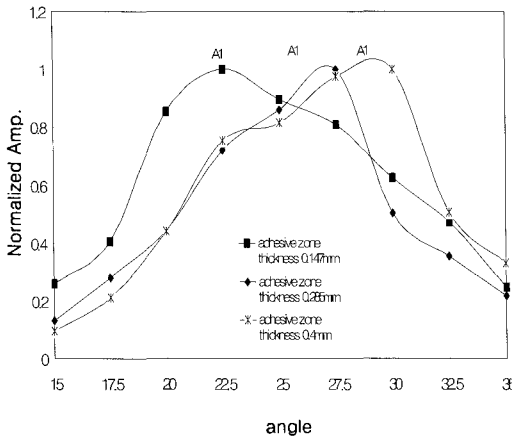


Fig. 11 Amplitude variation with respect to incident angle change in A₁(0.5mm)-epoxy : dp460(0.147, 0.285, 0.4mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

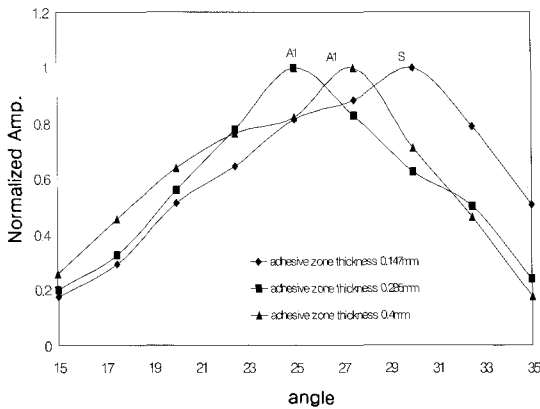


Fig. 12 Amplitude variation with respect to incident angle change in A₁(0.5mm)-epoxy : dp190(0.147, 0.285, 0.4mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

3.3. 주파수 변화에 따른 유도초음파 가진성(excitability)의 변화

가진 주파수를 변화시키면서 중심주파수가 1MHz인 탐촉자의 반응을 관찰하였다. 0.6MHz부터 1.3MHz까지 주파수를 변화시킨 결과, 탐촉자의 진폭은 주파수에 대해 큰 변화를 보이지 않았다(Fig. 13참조). 이에 따라, 본 연구에서 상기의 주파수대역 내에서 주파수를 변화시키며 발생된 판파의 진폭변화를 측정할 경우, 이는 적층내로 입사된 초음파에너지의 영향보다는 가진 주파수에 해당하는 판파 모드의 가진성(excitability)에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 이에 따라 고정된 입사각에서 주파수만을 변화시켜가며 비균질 적층 판재에서 유도초음파의 분산성 실험을 Figs. 14,15와 같이 수행하였다.

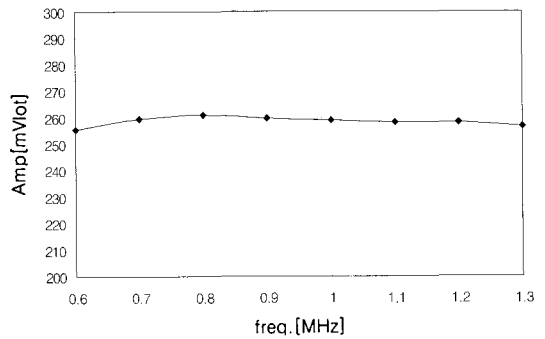


Fig. 13 Amplitude variation with respect to frequency sweeping

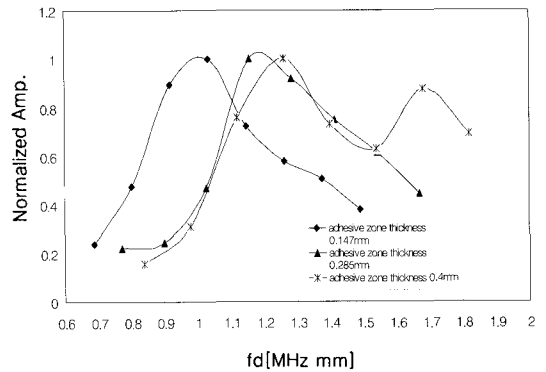


Fig. 14 Amplitude variation with respect to frequency sweeping in A₁(0.5mm)-epoxy : dp460(0.147, 0.285, 0.4mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

두께 0.5mm인 알루미늄 판재사이에 dp460 에폭시를 사용하여, 접합층 두께를 0.147mm, 0.285mm, 0.4mm로 변화 시켰다. 각각의 입사각도는 22.5°, 27.5°, 30° 로 고정하여 A₁ 모드만을 가진 시켰다. 실험결과, 접합층 두께 0.147mm인 경우는 fd가 1.0323[MHz mm]일 때 최고의 진폭을 나타내었고, 접합층 두께 0.285mm인 경우는 fd가 1.1565[MHz mm]일 때 최고의 진폭을 나타내었고, 접합층 두께 0.4mm인 경우는 fd가 1.26[MHz mm]일 때 최고의 진폭이 관찰되었다(Fig. 14참조).

Dp190 에폭시를 사용한 경우에는 접합층 두께를 0.147mm, 0.285mm, 0.4mm로 변화 시켰다. 두 에폭시의 재료상수차이에 대해 최대진폭을 나타내는 판파 가진점의 변화는 크지않음을 실험적으로 확인한 뒤 입사각도를 dp460의 경우와 25°, 27.5°, 32.5° 로 고정하여 A₁ 모드만을 가진 시켰다. 실험결과, 에폭시의 재료상수차이에 의해 dp460의 결과에 비해 최대진폭이 수신된 fd값의 위치가 다소 변화되었으나 접합층 두께가 증가할수록 최대진폭수신점의 fd는 동일 경향으로 증가함이 확인되었다(Fig. 15참조).

3.4. 균질 단일 구조물과 접합층이 얇은 비균질 적층 구조물에서의 분산성 비교

두께가 같은 균질 단일 판재와 dp460 에폭시의 두께를

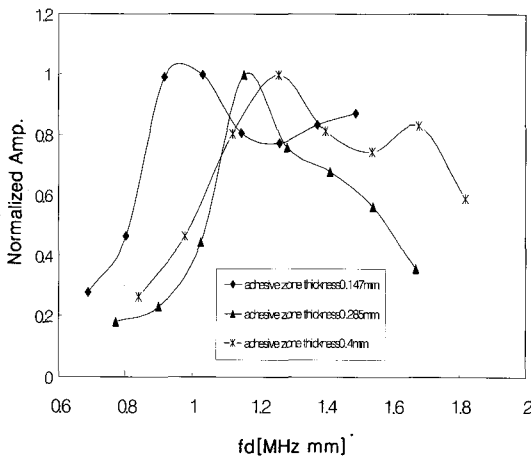


Fig. 15 Amplitude variation with respect to frequency sweeping in A₁(0.5mm)-epoxy: dp460(0.147, 0.285, 0.4mm)-A₁(0.5mm) multi-layered plate

무시할 수 있는 정도의 얇은 접합층을 갖는 비균질 적층 판재를 비교하면서 주파수와 입사각도를 변화시켜 구조물내의 판파의 분산성을 관찰하였다. 본 실험을 위해 준비된 시편에는 앞서 언급한 낚시줄을 삽입하지 않으므로써 접합층 두께를 실험적으로 최소화하였다. 단일 알루미늄 판재의 위상속도 분산선도를 비교하며 실험을 수행하였다. fd가 1[MHz mm]에서 S₀ 모드의 위상속도는 5.3041[mm/μsec]이고, 이때 이론 입사각도는 30.6° 이다.

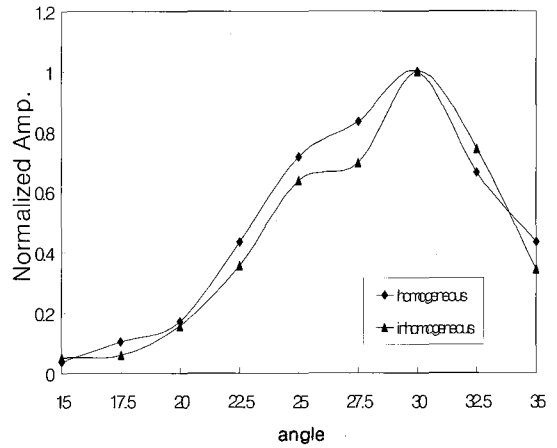


Fig. 16 Amplitude variation with respect to incident angle change in homogeneous and inhomogeneous plates

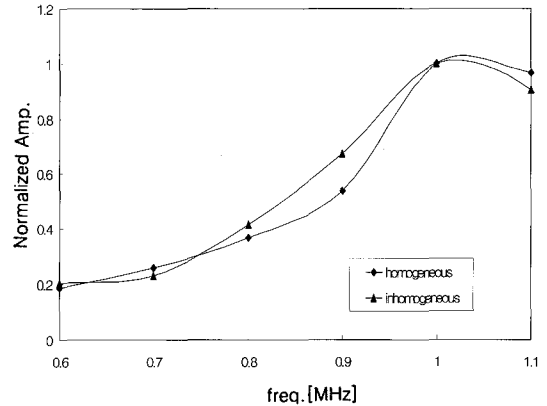


Fig. 17 Amplitude variation with respect to incident angle change in homogeneous and inhomogeneous plates

입사각도 변화 실험을 수행한 결과, 단일 알루미늄 판재와 적층 판재모두 실험적 최적 입사각도가 30°임을 알 수 있었다(Fig. 16참조). 입사각도 30°로 고정시키고 주파수를 변화시킨 결과, 두 판재 모두 주파수가 1MHz일 때 최고의 진폭을 나타내었다(Fig. 17참조). 이를 통해, 적층내의 접합층 두께가 얇아질 경우, 접합층의 재료상수 및 두께를 무시하고 단일 판재로 간주한 유도초음파실험이 가능함이 확인되었다.

4. 결 론

- (1) 비균질 적층 판재에서 유도초음파의 입사각도, 가진 주파수, 접합층의 물성치, 접합층의 두께에 따른 분산성을 이론적으로 해석하고, 실험을 통해 규명하였다.
- (2) 접합층의 두께가 다른 비균질 적층 판재에서 특정 모드만을 가진 시킬 경우, 접합층이 두꺼워 질수록 최적의 입사각도가 커짐을 실험을 통해 알 수 있었다. 이를 통해, 유도초음파를 이용한 비균질 적층 판재내의 접합층의 두께측정이 가능함을 제시하였다.
- (3) 적층 판재에서 접합층의 두께가 무시될 수 있을 정도로 충분히 얇을 경우, 적층 판재내 유도초음파의 분산성이 단일 판재의 경우로 수렴될 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

5. 후 기

본 연구는 한국과학재단 2000년도 특정기초연구비(과제번호. 1999-2-314-006-2)지원에 의해 수행되었기에 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] Thresher, E. N., "The Computation of The Dispersion of Elastic Waves in Layered Media," *J. Sound Vib.* 2 (3), pp. 210-226, (1965)
- [2] Adler, E. L., "Matrix Methods Applies to Acoustic Waves in Multilayers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, Vol. 37, No. 6, pp. 485-490 (1990)
- [3] D. N. Alleyne and P. Cawley, "The interaction of Lamb waves with defects," *IEEE Trans Ultrason, Ferro Freq Cont.*, vol. 39, no. 3, pp. 381-397, (1992)
- [4] Lowe, M. J. S., "Matrix Techniques for Modeling Ultrasonic Waves in Multilayered Media," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 42, No. 4, pp. 525-542, (1995)
- [5] Y. H. Cho, J. L. Rose, D. D. Hongerholt, "Defect characterization and sizing potential with guided waves: theory," presented at *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Seattle, WA, (1995)
- [6] Zhang, B., Yu, M., Lan, C. Q. and Xiong, W., "Elastic Wave and Excitation Mechanism of Surface Waves in Multilayered Media," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, No. 6, pp. 3527-3538, (1996)
- [7] Y. H. Cho, D. D. Hongerholt and J. L. Rose "Lamb Wave Scattering Analysis for Reflector Characterization," *IEEE Trans. Ultrason, Ferro Freq Cont.*, Vol. 44 No. 1, pp. 44-52, (1997)
- [8] Zhang, B., Xiong, W., Yu, M., Lan, C. Q. and Li, L., "Study of Energy Distribution of Guided Waves in Multilayered Media," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 103, No. 1, pp. 125-135, (1998)
- [9] 함효식, 조운호, 박정철, "탄성파에 의한 다층 구조내 층간 결함검출", 대한기계학회 경남지부 추계학회지, pp. 64-69, (1998)