

초음파 신호분석을 이용한 접착접합 이음의 결함평가

황영택* · 오승규** · 한준영*** · 장철섭**** · 윤송남***** · 이 원***** · 김환태*****

*삼척대학교 정밀기계공학과

**현대모비스 안전시스템부

***인천기능대 산업설비자동화과

****서울정보기능대 산업설비과

*****송실대학교 기계공학과 대학원

*****송실대학교 기계공학과

*****한국과학기술정보연구원 전문연구위원

Evaluation of Flaws in Adhesively Bonded Joint using Ultrasonic Signal Analysis

Yeong-Taik Hwang*, Seung-Kyu Oh**, Jun-Young Han***, Sup-Chul Jang****, Song-Nam Yun*****,
Won Yi***** and Hwan-Tae Kim*****

*Dept. of Precision Mechanical Engineering, Samcheok National University, samcheok 245-711, Korea

**Safety System R&D Dept. Hyundai Mobis, Yongin-Shi 449-910, Korea

***Dept. of Automation of Industrial Installation, Incheon Polytechnic College, Incheon 403-719, Korea

****Dept. of Industrial Installation, Seoul Information Polytechnic College, Seoul 157-015, Korea

*****Dept. of Mechanical Engineering, SoongSil University Graduate, Seoul 156-743, Korea

*****Dept. of Mechanical Engineering, SoongSil University, Seoul 156-743, Korea

*****Senior Research Fellow, Korea Institute of Science and Technology Information, Seoul 130-742, Korea

Abstract

Ultrasonic signals transmitted through adhesively bonded plates were used to evaluate parameters related to attenuation and frequency in the adhesively bonded joint. The kinds of bonding materials with a different bonding thickness of constant pressure were used. And, ultrasonic diagnosis was evaluated by p-wave sensor of 10MHz. FFT has been performed to determine bond-layer parameters such as effective thickness and frequency for adhesively bonded joint of Al6061 plates in comparison with measured to theoretical ratios. When variable thickness exists, the ultrasonic spectrum was changed the frequency wave. The more materials thickness and the higher the frequency, the larger shift was observed. Measured ratios for cases of bond thickness and variety bonding materials are then used to determine bond parameters. The results show that the technique can be applied to the characterization of adhesively bonded joint.

* Corresponding author : jyhan@kopo.or.kr

(Received December 3, 2003)

Key Words : Ultrasonic wave, Waveform analysis, Adhesively bonded joint, Attenuation coefficient

1. 서 론

구조물의 안전진단을 위한 방법으로 사용재료의 손상을 주지 않고 재료내의 물성변화를 측정하므로써 기존의 파괴적인 측정법을 보완할 수 있는 장점이 있는 비

파괴적 해석방법이 있다.

대표적인 비파괴적 해석 중 초음파를 이용하는 방법은 가장 간편하면서 또한 파형변화 등을 이용한 다양한 해석이 가능한 방법이다. 이중에서 감쇠계수 및 속도변화를 이용한 방법으로, 기계적성질과 초음파 신호를 상호 연관시켜 초음파에코를 분석하는 기술¹⁾, 주파수 응

답에 기초를 둔 스펙트럼분석 기술²⁾, 전송된 신호의 파워스펙트럼이 결합의 표면에 의해 영향을 받음을 확인한 음속-초음파 기술³⁾ 등 초음파를 이용한 각종 해석사례가 있다.

또한, 비균질층이 있는 재료에 대한 비파괴적 해석⁴⁾, 비파괴해석을 통한 파괴모드와의 상관관계를 분석하려는 연구⁵⁾, 음향방출법을 이용하여 피로구조물을 해석하려는 연구⁶⁾, 얇은 재료에 대한 후방복사파를 이용한 연구⁷⁾, 계면에 대한 비파괴해석⁸⁾ 등 최근 계면에서 반사되는 초음파의 파형해석을 통하여 접합 이음의 강도를 평가하려는 연구가 활발하게 시도되고 있다.

본 연구의 목적은 접착접합 이음에 대하여 서로 다른 접착매질과 두께변화에 대한 감쇠 및 주파수변화를 해석함으로써, 파괴모드 실험에 의해 얻어진 주파수파형의 이론대비 실험오차를 최소화하고, 실제적인 파괴실험에서 얻어진 비파괴 데이터와의 상호관계를 확립 할 목적으로 본 연구를 수행하였다.

이를 위해, 에너지절감을 위한 경량소재로써 사용량이 많아지고 있는 알루미늄합금을 이용하여, 접합면에서 발생하는 초음파특성을 파악하고, 향후 이런 데이터 특성을 통하여 이종재료 계면 응력해석을 위한 연구를 수행하였다.

2. 관련 이론

2.1 박층(薄層)의 수직통과율과 반사율

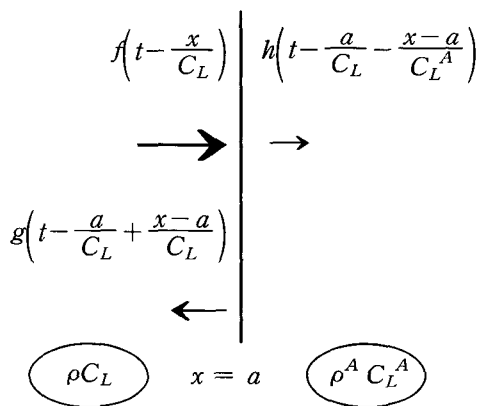


Fig. 1 Incident, reflected and transmitted waves by one-dimensional motion of an elastic continuum

여기서, t : 시간, ρ : 밀도, a : 계면까지의 응력파의 진행거리를 뜻한다.

일차원응력상태에서 선형이론에 의한 일차원파동방정식⁹⁾은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서, C_L 은 종파의 음속을 뜻한다.

Fig. 1과 같이 탄성파가 기계적 성질이 다른 두 매질 사이를 통과하는 경우, 경계층에서는 다음과 같이 응력파로써 입사파, 반사파, 투과파로 분류할 수 있다.

또한, Fig. 2 에서 나타낸 것과 같이 제1매질(Z_1)과 제3매질(Z_3)사이에 제2매질(Z_2)의 층이 두께 l , 파장 λ_2 로 존재하는 경우에 초음파가 제1매질로부터 경계층에 수직으로 입사하는 경우 음압반사율 r_{13} 과 음압통과율 t_{13} 은 다음의 식으로 주어진다¹⁰⁾.

$$r_{13} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_3} - 1\right) + j\left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_3}\right)\tan k_2 l}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right) + j\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)\tan k_2 l} \quad (2)$$

$$t_{13} = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right) + j\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)\tan k_2 l} \quad (3)$$

여기서, P_i 는 입사파의 음압이며, P_r 은 반사파의 음압이며 $k_2 = 2\pi/\lambda_2$, j 는 $\sqrt{-1}$ 이다.

또, 동일 재료의 접합일 경우 $Z_1 = Z_3$ 이므로 위의 식의 절대값은 다음과 같다.

$$|r| = \frac{\left(\frac{Z_2}{Z_1} - \frac{Z_1}{Z_2}\right)}{\sqrt{4\cot^2 k_2 l + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2}} \quad (4)$$

$$|t| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_2 l + \frac{1}{4}\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 \sin^2 k_2 l}} \quad (5)$$

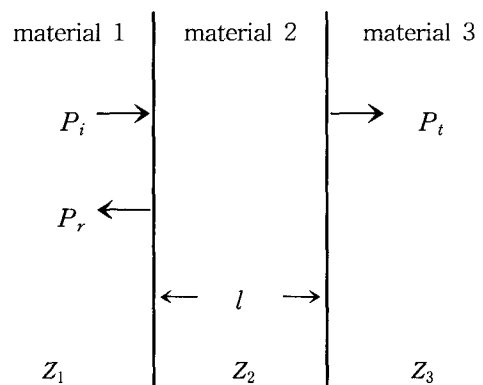


Fig. 2 Transmission and reflection of plane waves normally incident onto layer

2.2 초음파 파형의 파라미터

2.2.1 초음파 감쇠계수

Fig. 3(a)는 접착접합 이음의 초음파 탐상을 나타내고 있으며, Fig. 3(b)는 여기에 대응하여, 피착체를 관통하는 초음파 파형의 진행경로를 나타내고 있다. 재료내를 진행하는 초음파는 계면에서 반사 및 투과를 반복하며 그 크기는 Fig. 4와 같이 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타낸다¹¹⁾.

$$I = I_0 e^{-ax} \tag{6}$$

여기서, I 는 주파수에너지, a 는 감쇠계수이다.

초음파감쇠는 결정입자 및 조직에 의한 산란, 점성감쇠, 전위운동에 의한 감쇠, 잔류응력에 의한 산란 등이 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{1}{x_2 - x_1} 20 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \tag{7}$$

여기서, x_1, x_2 는 음파의 진행거리를 나타낸다.

2.2.2 주파수 스펙트럼

이종재료 접합부에서 측정된 초음파의 파형을 FFT 변환하여 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이 스펙트럼의 변화와 접착층의 두께와의 관계를 비교하여 특정 주파수를 획득 할 수 있다.

Fig. 4는 종파를 이용한 재료내의 A-scan을 나타낸

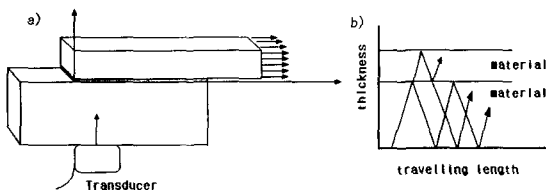


Fig. 3 Signal analysis of adhesively bonded joints

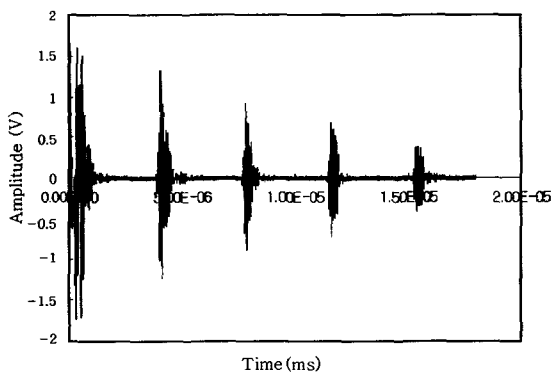


Fig. 4 A-scan of adhesively bonded joints

그림이며, Fig. 5는 A-scan에서 얻어진 초음파 파형을 주파수 영역으로 나타낸 것이다. 여기서 각각의 주파수를 독립한 좌표축으로 한 무한차원 공간에서 하나의 스펙트럼은 이 무한차원 공간의 한 점으로 나타낼 수 있다. 그리고, 이 무한차원 공간에서 일정 주파수범위($\Delta\omega$)로 주파수를 분할하여 n 개의 측정점을 선택하여 n 차원의 유한공간을 구성할 수 있다. 이 n 차원에서 스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$T_i = [F(\omega_1)_i, F(\omega_2)_i, \dots, F(\omega_n)_i] \tag{8}$$

여기에서 첨자 i 는 i 번째 측정치를 나타낸다. $F(\omega_j)_i$ 는 i 번째 측정치의 j 번째 주파수의 스펙트럼의 강도이다. 접합부에서 반사한 초음파 주파수 스펙트럼은 두께의 변화 등에 큰 영향을 받는다. 그리고, 탐촉자의 입사에너지를 일정하게 하기 위하여 스펙트럼의 절대치를 1로 정규화 한다.

즉,

$$|T_i| = \sqrt{\sum F(\omega_j)_i^2} = 1 \tag{9}$$

따라서, 일정 주파수범위로 분할된 n 차원의 스펙트럼을 각 차원의 단위 벡터의 성분 즉, 음압과 음속 그리고 주파수의 항을 이용한 파라미터에 대하여 파괴모드와의 상관관계를 분석하기 위한 특성인자를 얻고자 하였다.

3. 실 험

3.1 시스템의 구성

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이 하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결합 신호를 송·수신

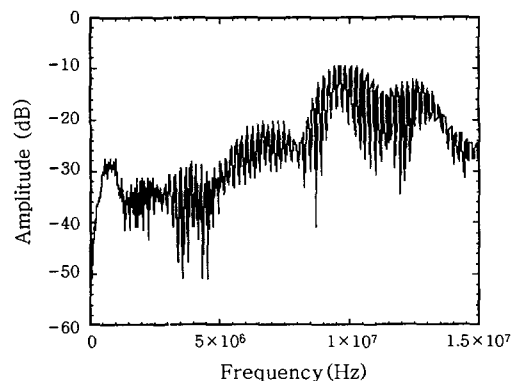


Fig. 5 FFT Analysis of adhesively bonded joints

하는 종파용 탐촉자(주파수 10MHz, 진동자 크기 : 10mm), 종파용 탐촉자를 사용하고 접착매질(글리세린) 등이다.

3.2 접착시험편

시험편은 피착체로 A6061-T6을 사용하였고, 피착체를 페이퍼로 표면 가공 후, 아세톤으로 세정작업을 하였다. 중간층의 매질은 Cemendine 1500과 Glycerine 을 사용하였다. Table 1, Table 2는 각각 시험편의 초음파특성과 시험편 형상을 나타내고 있다.

이 두 매질의 사용은 접착제 매질간의 초음파 특성을 분석하고, 매질에 따라 초음파의 전파특성이 상당히 다르며, 단지 매질만의 임피던스만을 파악하지 않고, 시험편의 접합특성에 따라 주파수특성이 달라질 수 있음을 확인하기 위하여 사용하였다. 그리고, 접착층은 두께가 얇은 테프론필름을 이용하여 0.5mm까지 40등분으로 만들어 피착체 사이의 매질을 일정압력 하에 끼워 두포하였다. 그리고, 시험편은 80도에서 2시간 유지 후, 노냉하여 실온상태에서 약 3일간 경화시켜 실험을 실시하였다.

3.3 초음파 신호획득 및 분석

초음파 트랜스듀서로부터 발생된 펄스는 두 계면사이에서 반사파와 투과파로 분해된다. 초음파 파형의 주파수분석은 계면 및 저면 반사파를 이용하여 파형을 분리하였으며, 실험에 의한 신호는 1 point 당 2ns의 간격으로 샘플링하였다. 또한, 여기서 획득한 주파수의 파형은 FFT 처리 후 각 매질의 접착층 두께에 따른 주파수의 변화를 분석하였다.

Table 1 Ultrasonic characteristics of materials

Medium	Density ρ (10^3 kg/m^3)	Velocity of longitudinal wave C (m/s)	Impedance Z ($10 \text{ kg/m}^2\text{s}$)
Al 6061	2.72	6,154	16.74
Cemedine	1.28	2,840	3.63
Glycerine	1.06	1,637	1.74

Table 2 Specimens and test requirement(A6061)

adherend thickness $t_1 \times t_2$ (mm)	bonding thickness (t_a , mm)
16×25	0 ~ 0.5
25×25	0 ~ 0.5

4. 결과 및 고찰

4.1 초음파 진폭의 감쇠 분석

두 매질의 접착면에서 초음파의 투과율과 반사율은 $\lambda/2$ 를 주기로 증가 또는 감소한다. 즉, 두께가 $\lambda/4$ 에서 투과율은 최소가 되고 $\lambda/2$ 에서 투과율이 가장 크다¹²⁾.

Fig. 6과 Fig. 7은 두 접착층 매질에 따른 접착층의 두께와 초음파진폭 감쇠 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 6은 Glycerine을 중간매질로 하였을 때 나타낸 것이다. 여기에서는 이론값과 실험값의 진동 주기가 상당히 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그 원인은 Glycerine을 접착층으로 하였을 때 접착층에서는 계면응력의 영향이 거의 없기 때문에 이론값과의 진동 주기는 잘 일치하고 있다고 생각된다.

Fig. 7은 Cemendine 1500에서 두께 25mm×25mm 접착시험편에서 10MHz에서의 실험값을 나타

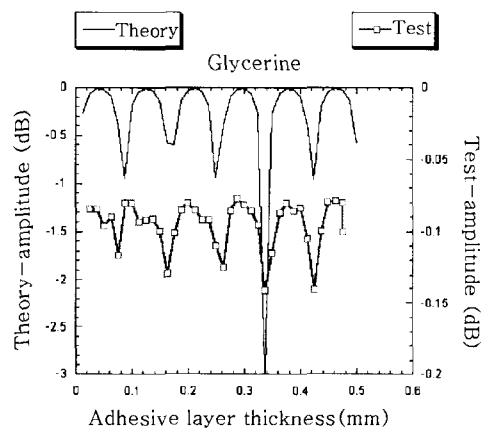


Fig. 6 Amplitude change comparison of adhesive layer thickness and attenuation for Glycerine (25mm×25mm)

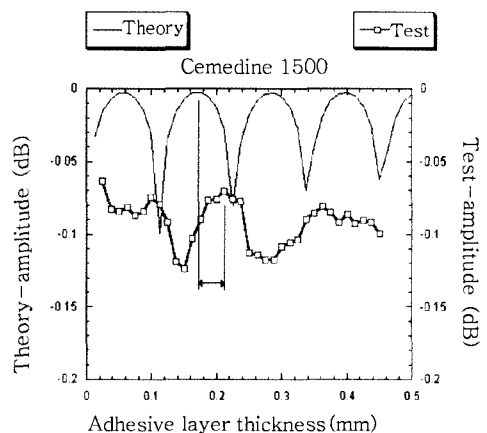


Fig. 7 Amplitude change comparison of adhesive layer thickness and attenuation for Cemendine1500 (25mm×25mm)

낸 것이다. 여기에서 보면 증감특성은 거의 일치한 양상을 보여주고 있다. 그러나 실험데이터는 이론값에 비하여 X축 상에서 0.025mm 만큼 증감구간이 먼저 나타나고 있으며 진폭 또한 약간 작다. 이는 시험편을 접착하는 과정에서 접착층에 기포, 접착 불량에 의해 진폭에 영향을 미치며, 두 재료의 접착시에 발생하는 접착계면 응력 등의 영향으로 접착매질의 초음파 전파속도가 작아진 것으로 생각된다. Fig. 8은 접착층두께 0.5mm에서의 각종 결함이 발생된 샘플을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시험편을 접합면에 대해 파단후의 파단면에서 기공 및 미접착부분이 보여지고 있다.

이상의 실험에서 접착층에서 초음파의 전파속도 변화 및 감쇠의 영향에 의해 이종재료에서의 접착접합 결합(접착불량, 기포, 접착 응력)을 평가 할 수 있는 한가지 방법으로 유용하다고 생각된다.

4.2 초음파 주파수 분석

4.2.1 중간층 매질 Cemedine1500 을 이용한 주파수 분석

주파수 분석은 식(8)을 이용하여 5MHz ~ 15MHz에서 주파수 영역을 n차원의 유한 공간으로 나누고 벡터를 구하여 그 벡터중에서 명확한 특성을 가진 단위



Fig. 8 Flaws comparison by adhesive layer thickness 0.5mm

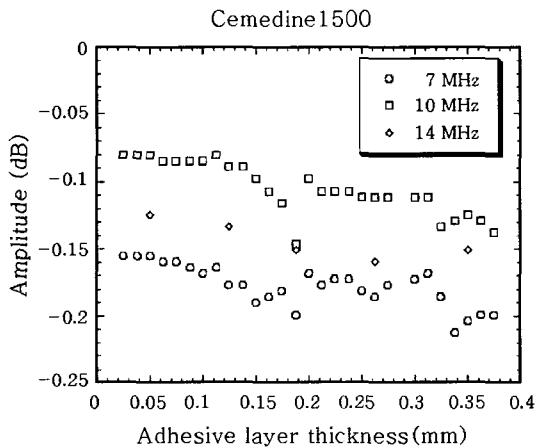


Fig. 9 Frequency comparison of adhesive layer thickness and amplitude for Cemedine1500 (16mm×25mm)

벡터를 추출하였다. Fig. 9, Fig. 10은 Cemedine 1500에 대한 피착체두께 16mm × 25mm 접착시험편의 주파수 분석을 나타낸 것이다. 여기서는 주파수 스펙트럼에서 피착체 두께 변화에 따라 진폭이 작아지는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 10에서는 접착층 두께가 작을 때에는 피크 주파수는 10MHz보다 작지만 접착층 두께의 증가에 따라 피크 주파수가 점점 증가함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 11, Fig. 12는 Cemedine 1500에 대한 피착체두께 25mm×25mm 접착시험편의 주파수 분석을 나타낸 것이다.

여기서, Fig. 11에서 접착층 두께가 0.2mm 부근에서 진폭이 크게 감소함을 확인할 수 있고 각 주파수가 크게 변화하는 구간이 서로 다른 양상을 나타내고 있다.

Fig. 12는 접착층 두께가 주파수 대역에 의한 진폭의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 접착층 두께에 따라서는 전주파수대역이 거의 같은 패턴으로 변화하고

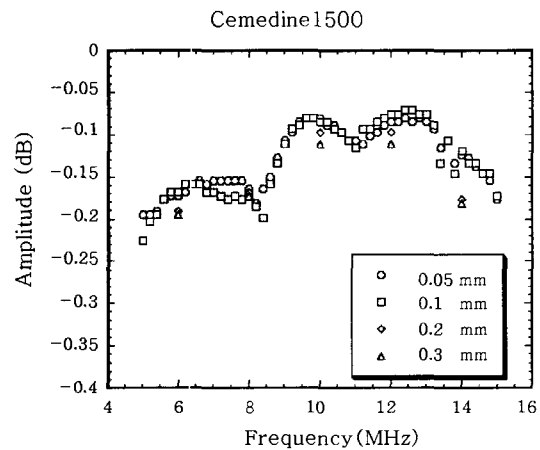


Fig. 10 Adhesive layer thickness comparison of frequency and amplitude for Cemedine 1500 (16mm×25mm)

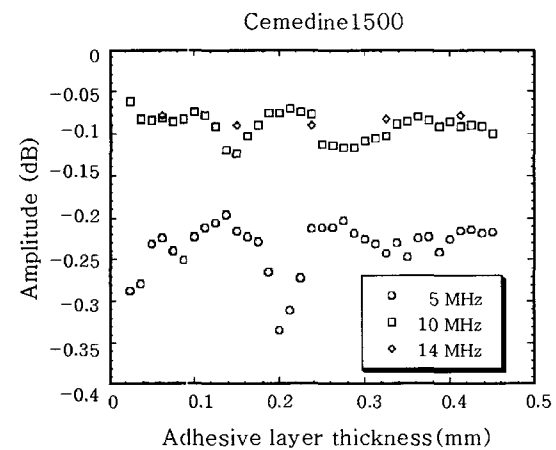


Fig. 11 Frequency comparison of adhesive layer thickness and amplitude for Cemedine 1500 (25mm×25mm)

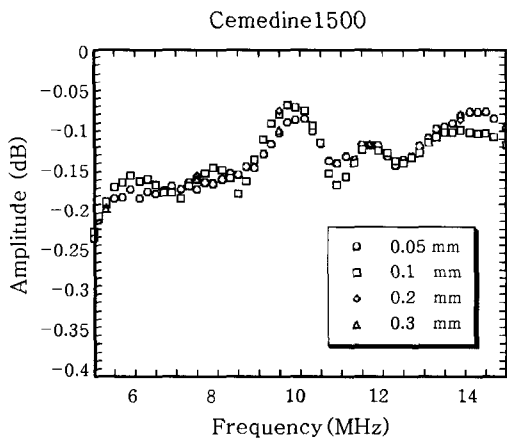


Fig. 12 Adhesive layer thickness comparison of frequency and amplitude for Cemedine 1500 (25mm×25mm)

그 차이는 크지 않다. 특히, 접착층 두께가 0.2mm에서는 5MHz부근에서 비교적 큰 변화가 발생된다는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 13은 중간층 매질을 Cemedine 1500을 이용한 접착층 두께에 따른 주파수와 진폭과의 관계를 MATLAB을 이용하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Cemedine 1500은 접착층 두께에 따라 주파수의 파동의 양식에 많은 변화를 볼 수가 있다. 이러한 현상은 접착층내의 미세결합의 분포에 따른 파동의 왜곡현상이라고 생각된다. 따라서, 이러한 파동의 왜곡현상을 분석해보면 이종재료 접착접합 강도의 불균일성을 예측할 수 있다.

4.2.2 중간층 매질 Glycerine을 이용한 주파수분석

Fig. 14, Fig. 15는 중간층매질을 Glycerine, 피착체두께 16mm×25mm 접착시험편의 주파수 분석을 나타낸 것이다. Fig. 14에서 Glycerine의 경우 일정한 주기로 파동이 발생함을 확인 할 수 있었으며, 주파수

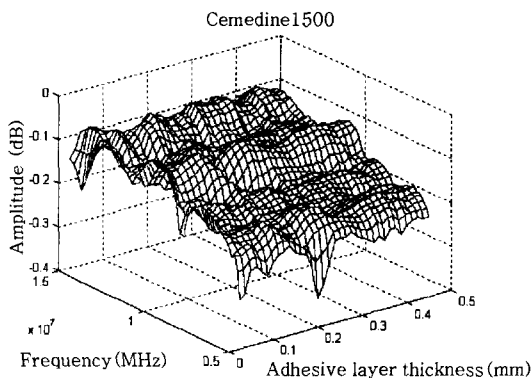


Fig. 13 Correlation distribution of adhesive thickness vs. frequency of Cemedine adhesive layer

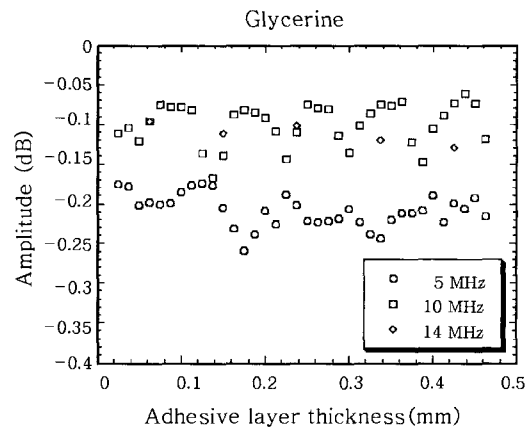


Fig. 14 Frequency comparison of adhesive layer thickness and amplitude for Glycerine (16mm×25mm)

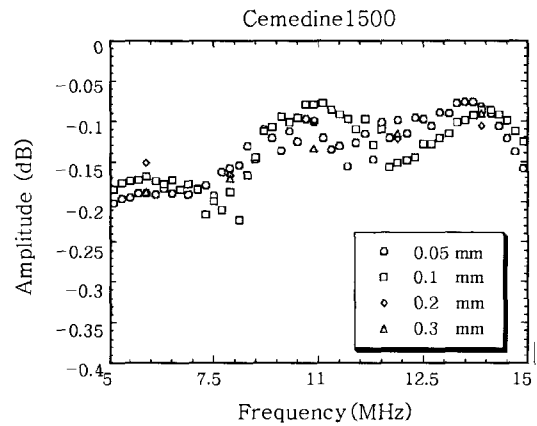


Fig. 15 Adhesive layer thickness comparison of frequency and amplitude for Glycerine (16mm×25mm)

대역에 있어서 두께에 따라 반사가 상당히 분산적으로 나타나고 있다.

Fig. 16, Fig. 17은 중간층매질을 Glycerine, 피착체두께 25mm×25mm 접착시험편의 주파수 분석을 나타낸 것이다. 여기에서도 피착체두께 16mm×25mm 시험편과 상당히 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, Glycerine의 경우 두가지 두께가 다른 시험편에서 경향의 일치성을 나타내고 있다. 이것은 두 시험편에서 Glycerine의 접착매질의 초음파 통과율이 매우 일정하기 때문이라고 생각된다. 즉, 두 피착체 사이의 중간매질층에 기공, 계면균열 및 미접착 부위가 없기 때문에 투과상태가 아주 우수하기 때문이라고 생각된다.

그러나 Cemedine 1500의 경우는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 그 원인은 Cemedine 1500의 경우 이종재료 접착시에 발생하는 기공, 미접착 및 열응력의 영향에 의해 계면응력이 발생하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 18은 중간층 매질을 Glycerine을 이용한 접착층

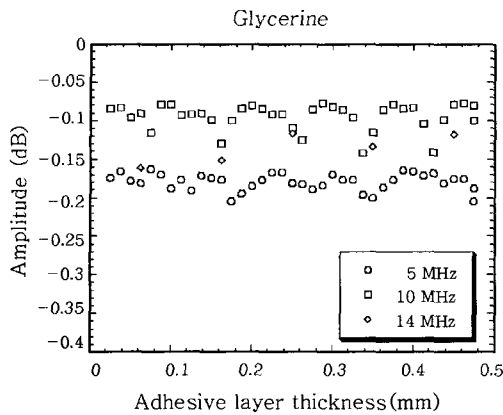


Fig. 16 Frequency comparison of adhesive layer thickness and amplitude for Glycerine (25mm×25mm)

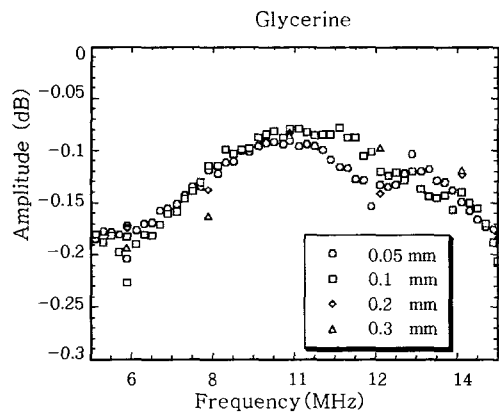


Fig. 17 Adhesive layer thickness comparison of frequency and amplitude for Glycerine (25mm×25mm)

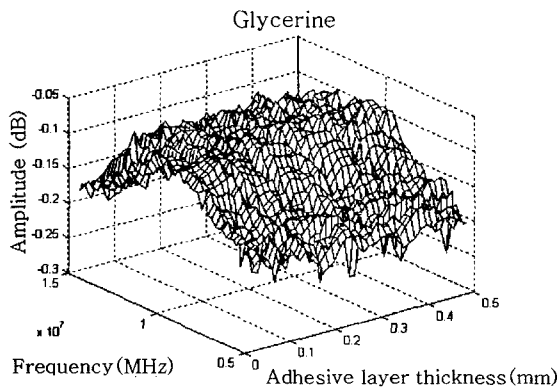


Fig. 18 Correlation distribution of adhesive thickness vs. frequency of Glycerine adhesive layer

두께에 따른 주파수와 진폭과의 관계를 MATLAB을 이용하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Glycerine은 접착층 두께에 따른 주파수의 파동의 양식이 상당히 일치하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Glycerine을 투과하는 초음파가 계면에서의 산란반사가 미세하고 결함이 없이 투과하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 이러한

주파수 파동의 균일한 양상을 분석하면 이에따른 이종 매질 및 접착접합층의 결합상태를 보다 분명하게 비교 분석할 수 있다고 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 초음파의 감쇠계수와 주파수 분석을 통하여 접착이음의 접착접합 이음의 결합평가에 영향을 미치는 파라미터를 규명하기 위해, A 6061-T6 접착시험편의 접착층 두께에 따르는 접착접합 시험편을 제작하여 시험편의 길이 방향에 따라 측정된 초음파 파형 파라미터와 접착층의 상태와의 상관관계를 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 반사율의 증감구간(파동 주기와 피크치)의 이론 값과 실험 값의 비교를 통하여 증감구간의 차이로써 매질에 따른 접착면의 상태를 평가하였다.
- 2) 피착체의 두께가 다른 경우 반사율은 접착층 두께의 증가에 따라 감소하는 추세를 알 수 있으나 피착체의 두께가 같은 경우에는 반사율이 거의 변하지 않음을 확인하였다.
- 3) 주파수 분석을 통하여 접착층 두께가 다름에 따라서 서로 다른 주파수 대역에서 주파수 감쇠가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 이것은 이후의 접착면의 평가에서 평가를 수행하기 위한 구간을 활용하는데 유용할 것으로 생각된다.
- 4) 피착체 및 접착층 두께에 따른 피크 주파수의 분석으로 접착 계면의 상태를 분석하는데 유용한 파라미터임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. P.Dickstein, J.Spelt and A.Sinclair : Application of higher order crossing feature to non-destructive evaluation - A sample demonstration of sensitivity to the condition of adhesive joints, *Ultrasonics*, Vol. 29 (1991), 355~365
2. C.Guyott and P.Cawley : Evaluation of the cohesive properties of adhesive joints using ultrasonic spectroscopy, *NDT International*, 21-4 (1991), 233~240
3. A.Tiwari., E.II.Henneke and J.Duke : Acousto-ultrasonic technique for assuring adhesive bond quality, *J. of Adhesion*, Vol. 34 (1991), 1~15
4. Y.H.Cho, H.S.Han and H.H.Choi : Thickness Assessment of Adhesive Layer in Inhomogeneous Layer by Guided Wave, *J. of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 21-4 (2001), 391-397 (in Korean)

5. S.K.Oh, Y.T.Hwang and W.Yi : Quantitative Nondestructive Evaluation of Bonded Joints utilizing Pulse-Echo Ultrasonic Test, Journal of the Korea Society of Precision Engineering, **20-3** (2003), 15~16 (in Korean)
6. O.Y.Kwon K.J.Lee : Assessment of Fatigue Damage of Adhesively Bonded Composite-Metal Joints by Acousto-Ultrasonics and Acoustic Emission, J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, **21-4** (2001), 425-43 (in Korean)
7. Y.H.Kim, S.D.Kwon, S.J.Song and M.H.Jung : Effects of Rubber Loading on the Ultrasonic Backward Radiation Profile of Leaky Lamb Wave, J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, **22-5** (2002), 508-515 (in Korean)
8. Kato Kan, Shindairo : Waveform analysis of ultrasonic wave reflected from bonding interface and its application to nondestructive evaluation of bonding strength, Nondestructive Testing, **44-12** (1995) (in Japanese)
9. J.D.Achenbach : Wave Propagation In Elastic Solids, North-Holland, 1993, 21~29
10. J.L.Rose and P.A.Meyer : Ultrasonic Signal Processing Concepts for Measuring the Thickness of Thin Layer, Mater. Eval., **32-2**, (1974), 249~235
11. F.Fahy : Sound and Structural Vibration Radiation, Transmission and Response, ACADEMIC PRESS (1985), 167~172
12. 根庵勝雄, 高木賢志郎 : 超音波技術, 東京大學出版會, 1989, 151-152 (in Japanese)