

접착부재의 계면에 대한 초음파 탐상 특성

정 남 용^{*1)} · 박 성 일²⁾

숭실대학교 기계공학과¹⁾ · 숭실대학교 대학원 기계공학과²⁾

Characteristics of Ultrasonic Test on Interfaces of Adhesively Bonded Components

Namyong Chung^{*1)} · Sungil Park²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering Graduate School, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 21 July 2003 / Accepted 9 December 2003)

Abstract : The application of adhesively bonded components is increasing in various industries such as automobile, aircraft, IC packages, and soldering techniques. In spite of such wide application in adhesively bonded components, nondestructive test techniques applying to adhesively bonded components have not been clearly established yet. In this paper, characteristics of ultrasonic test on interfaces of adhesively bonded components have been investigated by calculating transmission coefficient theoretically and experimentally. From the experimental results, the optimum conditions to establish frequencies for adhesively bonded homogeneous and dissimilar components are 4~6 MHz and 2~4 MHz, respectively.

Key words : Acoustic impedance(음향 임피던스), Adhesively bonded components(접착부재), Dissimilar materials(이종재료), Homogeneous material(동종재료), Fourier transform(푸리에 변환), Transmission coefficient(투과율), Ultrasonic test(초음파 탐상)

1. 서론

신소재 개발에 따른 구조 접착부재의 발전은 고기능화, 경량화, 내구성에 대한 신뢰성을 향상 시킬 수 있는 장점으로 인하여 자동차, 항공기, IC 패키지 및 우주선은 물론, 레저 및 스포츠 용품 등 각종 산업분야에서 그 활용범위가 날로 증가하고 있다. 따라서, 이들 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위한 비파괴검사의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 구조 접착부재의 접착계면은 미시적 구조의 복잡성 및 특이성으로 인하여 체계적인 비파괴검사의 연구

가 확립되지 않은 상태이다. Kline 등¹⁾은 접착이음에 대한 비파괴 평가에 대해 연구하였고, Ping²⁾은 통과 및 반사 펄스를 이용한 산란과 감쇠 측정에 대해 연구하였다. 그러나, 접착부재의 계면에 대해 초음파 탐상을 적용할 때 정밀도에 영향을 미치는 음향 임피던스, 접착층 두께 및 주파수 등에 의해 발생하는 초음파 산란에 따른 초음파 탐상 특성에 관한 연구 결과는 보고되지 않고 있다. 초음파 탐상을 동종 및 이종 접착부재에 적용할 경우 탐상 주파수, 얇은 접착층의 두께, 접착부재의 밀도 및 초음파 속도에 의한 음향임피던스의 차이에 의해 초음파 산란이 발생하여 음압이 현격히 감소한다.³⁻⁶⁾ 접착부재의 계면에 대한 초음파 산란에 따른 음압의 감소를 보정하기

*To whom correspondence should be addressed.
nychung@hanmail.net

위해서 초음파가 수직으로 입사할 때 초음파 산란에 영향을 미치는 각종 인자의 검토와 이들 인자에 의한 산란의 효과적인 보정은 초음파 탐상의 정밀도 향상에 있어 매우 중요하다.⁷⁻¹⁰⁾

따라서, 본 연구에서는 접촉매질, 모재 및 접착층으로 조합되어진 접착부재의 음압투과율 식을 유도한 후 접착부재의 계면에 대한 초음파 탐상 특성을 연구하고자 한다.

접착 시험편은 결정구조인 강(Steel)과 알루미늄(Al)합금, 그리고 비결정 구조인 아크릴(Acryl)수지의 접착체를 세메다인(Ced.) 1500으로 접착시킨 동종 및 이종 접착부재의 시험편을 제작하여 음향 임피던스의 변화에 따른 음압투과율 및 주파수 관계, 푸리에 변환에 의한 접착계면에서의 주파수 응답, 접착층 두께 변화에 따른 주파수 관계 등의 초음파 특성을 비교·검토한 후 초음파 수직 탐상에 대한 최적의 초음파 탐상 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편의 형상 및 치수

접착부재에 대한 최적의 산란 보정 인자를 설정하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 시험편을 제작하였다. 예비균열의 길이 $a=10\text{ mm}$, 전체길이 $L=135\text{ mm}$ 로 하였고, 접착층의 두께 $h=0.2\sim 0.6\text{ mm}$ 로 변화시켰다. 접착체는 균질재료 알루미늄 합금, 강과 아크릴 수지이고, 접착체는 구조접착제로 널리 사용되고 있는 세메다인 1500을 사용하였다. 또한, 시험편의 접착체 조합 방법은 Table 1과 같고, 실험에 사용된 접착체와 접착체의 물성치 및 초음파 특성치는 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

2.2 시험편의 제작

접착체를 소정의 치수로 밀링 가공하고, 접착면을 #220의 샌드 페이퍼로 연마한 후 아세톤으로 세척하고, 세메다인 1500의 접착제로 접착시켜 Fig. 1과 같은 접착부재 시험편을 제작하였다. 접착체는 주재와 경화제의 혼합형인 세메다인 1500을 사용하였고, 주재와 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하였다. 접착층의 두께를 일정하게 유지시키기 위하여 각각 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm 두께의 테플론 필름을 삽입하였다.

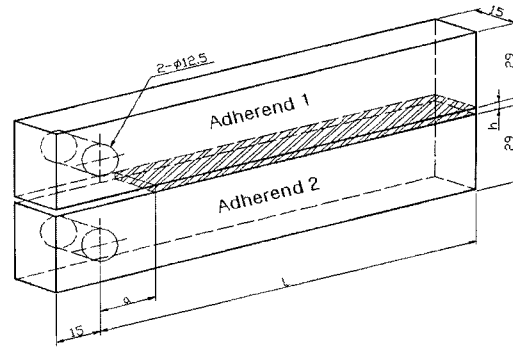


Fig. 1 Shape and dimension of DCB specimen in adhesively bonded components

Table 1 Types of adhesively bonded components

| Specimens | | Adherends | | Adhesive |
|----------------------|----------|-----------|-------|---------------|
| | | 1 | 2 | |
| Homogeneous material | Type 1-1 | Acryl | Acryl | Cemidine 1500 |
| | Type 1-2 | Steel | Steel | |
| | Type 1-3 | Al | Al | |
| Dissimilar materials | Type 2-1 | Acryl | Steel | |
| | Type 2-2 | Acryl | Al | |
| | Type 3-1 | Steel | Acryl | |
| | Type 3-2 | Steel | Al | |
| | Type 4-1 | Al | Acryl | |
| Type 4-2 | Al | Steel | | |

Table 2 Material properties of adherends and adhesive

| Material properties | | Density ρ (10^3kg/m^3) | Young's modulus E(GPa) | Poisson's ratio ν |
|---------------------|----------|---|---------------------------|-----------------------|
| | | | | |
| Adherends | Acryl | 1.18 | 2.94 | 0.35 |
| | Steel | 7.80 | 174.70 | 0.32 |
| | Al | 2.70 | 65.56 | 0.32 |
| Adhesive | Ced.1500 | 1.07 | 2.06 | 0.40 |

Table 3 Ultrasonic properties of adherends and adhesive

| Material properties | | Impedance Z ($10^6\text{kg/m}^2\text{s}$) | Longitudinal wave velocity $C_L(\text{m/s})$ |
|---------------------|-----------|---|---|
| | | | |
| Adherends | Acryl | 3.20 | 2,720 |
| | Steel | 46.00 | 5,900 |
| | Al | 16.90 | 6,260 |
| Adhesive | Ced. 1500 | 2.20 | 2,034 |

접착압력은 지그를 사용하여 일정하게 작용시키고, 접착 시험편은 지그에 고정된 상태로 전기로 내에서 60℃로 2시간 동안 경화시켰다.

2.3 실험방법

초음파 탐상기는 오실로스코프(Tektronix TDS 3032)와 수직 탐촉자를 사용하였고, 주파수는 함수파형 발생기(Function Waveform Generator)를 사용하여 1~8MHz 범위로 변화시켰다. 또한, 탐상감도는 BS(British Standard) 블록(block) A4 대비 시험편을 사용하여 감도를 80%로 맞추었고, 접촉매질은 글리세린을 사용하였다. 동종 및 이종 접착부재에서의 음압 차는 대비 시험편에서의 음압과 초음파 탐상에서 발생하는 제1회 저면 에코와 제2회 저면 에코의 비로 계산하였다.

3. 접착부재에 대한 음압투과율

3.1 재료 조합의 수가 2, 3개층인 경우

초음파가 접착부재에 수직으로 투과하는 문제는 각 매질의 밀도와 초음파 속도에 의한 음향 임피던스를 고려하여야 한다.

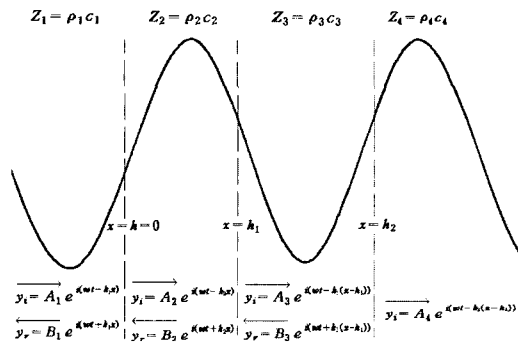


Fig. 2 Diagram of incident and reflected ultrasonic waves on adhesive interfaces

Fig. 2는 초음파가 시험편에 수직입사 할 때의 형상을 나타낸 것이다. 이때 조합되는 재료의 수가 2개층 즉, 음향 임피던스가 Z_1, Z_2 인 경우와 3개층에서의 음향 임피던스가 Z_1, Z_2, Z_3 일 때, 음압투과율은 각각 다음 식과 같이 된다.⁶⁾

$$t = \frac{A_2}{A_1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

$$t = \frac{A_3}{A_1} = \frac{2Z_1/Z_3}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right)\cos k_2 h + i\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)\sin k_2 h} \quad (2)$$

여기서, h 는 접착층의 두께, $k_2 = 2\pi/\lambda$, $\lambda = C_L/f$, λ 는 파장, C_L 는 재료의 종파속도, f 는 주파수를 의미한다.

3.2 재료 조합의 수가 4개층인 경우

접착부재에 대한 초음파 탐상시 모재와 접착층 및 접착 매질층까지를 고려한다면, 조합되는 재료의 층은 수가 4개층이 되고, 음향 임피던스는 각각 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 의 4개로 되므로 음압투과율의 식은 다음과 같이 유도된다.

음향 임피던스 Z_1 과 Z_2 에서 경계층이 $x=0$ 인 경우 입사할 때의 입사 변위 y_i 와 반사 변위 y_r 의 합은 통과한 후 다시 입사할 때의 입사 변위와 반사 변위의 합과 같다고 하면, 식 (3)과 같이 표시된다.

$$A_1 e^{i(ut - k_1 x)} + B_1 e^{i(ut + k_1 x)} = A_2 e^{i(ut - k_2 x)} + B_2 e^{i(ut + k_2 x)} \quad (3)$$

경계층이 $x=0$ 에서 식 (3)을 $T(\partial y/\partial x)$ 로 편미분하고, $T(k/w) = T/c = \rho c = Z$ 의 관계를 고려하여 정리하면, 다음 식과 같이 된다.

$$A_1 = \frac{A_2(Z_1/Z_2 + 1) + B_2(Z_1/Z_2 - 1)}{2Z_1/Z_2} \quad (4)$$

음향 임피던스 Z_2 와 Z_3 에서 경계층이 $x=h$ 인 경우 식 (3)과 식 (4)의 유도 과정을 적용하여 정리하면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_2 e^{i(ut - k_2 x)} + B_2 e^{i(ut + k_2 x)} = A_3 e^{i(ut - k_3(x-h))} + B_3 e^{i(ut + k_3(x-h))} \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} e^{ik_2 h} \left\{ \frac{Z_2/Z_3 + 1}{Z_2/Z_3} A_3 + \frac{Z_2/Z_3 - 1}{Z_2/Z_3} B_3 \right\} \quad (6)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} e^{-ik_2 h} \left\{ \frac{Z_2/Z_3 - 1}{Z_2/Z_3} A_3 + \frac{Z_2/Z_3 + 1}{Z_2/Z_3} B_3 \right\} \quad (7)$$

또한, 음향 임피던스 Z_3 과 Z_4 에서 경계층이 $x=h$ 인 경우도 마찬가지로 식 (3)과 식 (4)의 유도 과정을 적용하여 정리하면, 다음 식과 같이 된다.

$$A_3 e^{i(\omega t - k_3(x-h))} + B_3 e^{i(\omega t + k_3(x-h))} = A_4 e^{i(\omega t - k_4(x-h_1))} \quad (8)$$

$$A_3 = \frac{Z_3/Z_4 + 1}{2Z_3/Z_4} A_4 e^{ik_3(h_1-h)} \quad (9)$$

$$B_3 = \frac{Z_3/Z_4 - 1}{2Z_3/Z_4} A_4 e^{-ik_3(h_1-h)} \quad (10)$$

식 (6)과 식 (7)에 식 (9)와 식 (10)을 각각 대입하고, 이때 구해진 값을 식 (4)에 다시 대입하여 정리하면, 조합되는 재료의 수가 4개층인 경우의 음압투과율은 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$t = \frac{A_4}{A_1} = \frac{2Z_1/Z_4}{B^* + C^* + D^* - E^*} \quad (11)$$

여기서,

$$B^* = (Z_1/Z_4 + 1) \cos k_2 h \cdot \cos k_3 (h_1 - h),$$

$$C^* = i(Z_1/Z_2 + Z_2/Z_4) \sin k_2 h \cdot \cos k_3 (h_1 - h),$$

$$D^* = i(Z_1/Z_3 + Z_3/Z_4) \cos k_2 h \cdot \sin k_3 (h_1 - h),$$

$$E^* = (Z_1/Z_2 \cdot Z_3/Z_4 + Z_2/Z_3) \sin k_2 h \cdot \sin k_3 (h_1 - h)$$

식 (11)에서 $Z_1 = Z_2$, $Z_3 = Z_4$ 와 $h = h_1$, $h = 0$ 이라 가정하면, C^* , D^* , E^* 는 0이 되어 식 (1)과 같이 2개층에 대한 음압투과율의 식이 된다. 또한, 식 (11)에서 $Z_3 = Z_4$ 와 $h = h_1$ 이라고 가정하면, D^* 와 E^* 는 0이 되어 식 (2)와 같이 3개층에서의 음압투과율이 된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 음향 임피던스 비와 음압투과율의 관계

4.1.1 동종 및 이종 접착부재 - 접촉매질층의 영향을 고려하지 않은 3개층의 경우

음압은 음파의 세기로서 매질에 대한 음압의 계산은 초음파 탐상에서 정밀도와 밀접한 관련이 있다.

Fig. 3은 유도되어진 음압투과율의 식을 검증하기 위하여 음향 임피던스의 비와 이론 음압투과율의 관계를 나타낸 것이다. 동종 접착부재인 경우 비결정질 재료인 Type 1-1에서는 이론 음압투과율과 잘 일치하고, 결정질 재료인 Type 1-2, 1-3에서는 Type 1-1과는 달리 음향 임피던스의 차이로 발생하는 초음파 산란으로 인해 이론 음압투과율과 차이를 나타낸다.

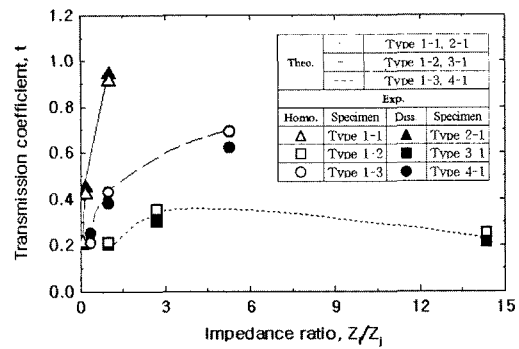


Fig. 3 Relationship between transmission coefficient and impedance ratio without consideration of couplant medium layer

이종 접착부재인 경우 매질의 서로 다른 음향 임피던스의 차와 접착층 두께 등의 영향으로 이론값과 차이를 나타낸다.

4.1.2 동종 및 이종 접착부재 - 접촉매질층의 영향을 고려한 4개층의 경우

Fig. 4는 음향 임피던스 비와 식 (11)에서 계산된 이론 음압투과율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3과 음압투과율을 비교하여 보면 접촉매질층에서의 음향 임피던스 차이로 발생하는 초음파 산란에 의해 음압투과율 값이 전체적으로 감소한다. 또한, 동종 및 이종 접착부재를 비교하여 보면, 동종 접착부재에서 음압투과율이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 접촉매질층과 접착계면에서 발생하는 초음파 산란은 음향 임피던스 비의 영향을 받는 것을 의미한다.

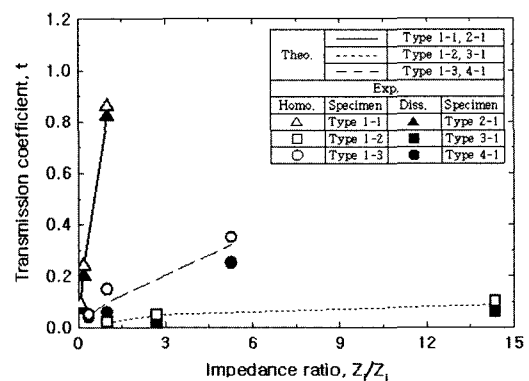


Fig. 4 Relationship between transmission coefficient and impedance ratio considering couplant medium layer

4.2 푸리에 변환에 의한 주파수응답

4.2.1 동종 접착부재인 경우

접착부재의 접착계면은 미시적 구조의 복잡성과 특이성으로 인해 초음파 산란이 크게 발생하는 곳이다. 이러한 접착계면에서의 초음파 탐상 특성을 정확하게 파악하기 위해 주파수 대역을 푸리에 변환을 이용하여 주파수 응답을 확인하였다.

Fig. 5는 Type 1-3 시험편에서 수신된 초음파 파형을 나타낸다. 첫번째 주기 파형에서는 음압이 크게 나타나지만, 그 외의 주기에서는 초음파 산란으로 인해 음압이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 모재 및 접착층에서의 신호에 대한 데이터를 각각 분리 취합한 결과를 푸리에 변환으로 구한 주파수 응답을 나타낸 것이다. 접착부재에 대한 초음파 탐상에 있어서 중요한 것은 접착계면에서 나타나는 신호에 대한 분석이다. 따라서,

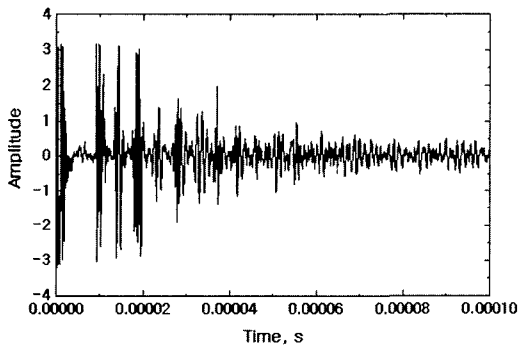


Fig. 5 Ultrasonic waveform from homogeneous adhesively bonded components (Type 1-3)

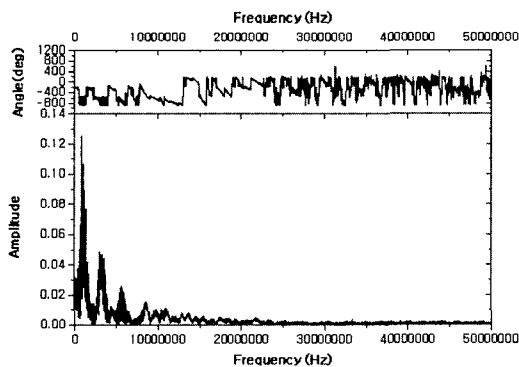


Fig. 6 Fourier transforms of Type 1-3 from adhesively bonded components

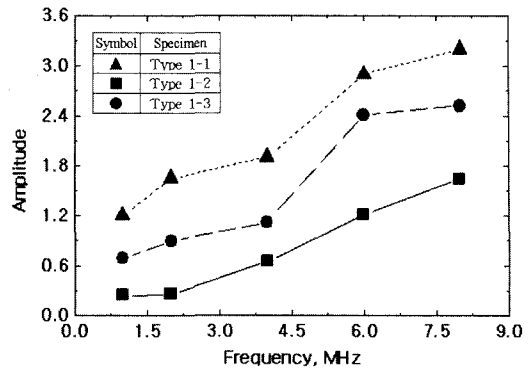


Fig. 7 Relationship between amplitude and frequency by Fourier transform in homogeneous material

Fig. 7은 Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 이용하여 푸리에 변환으로 구한 주파수 응답에서 접착 계면에 대한 진폭값을 나타낸 것이다. 그 결과 주파수와 진폭값이 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

4.2.2 이종 접착부재인 경우

동종 접착부재에 적용한 방법을 이종 접착부재에서도 같은 방법으로 적용하였다.

Fig. 8은 이종 접착부재의 푸리에 변환에 의한 주파수 응답을 나타낸 것이다. 동종 접착부재와는 달리 주파수가 1MHz와 8MHz에서는 진폭값이 작아지고, 2~6MHz에서는 1~8MHz에 비해 상대적으로 진폭값이 크게 나타난다. 이러한 현상은 음향 임피던스의 비가 클수록 진폭값도 크게 나타나고, 작을수록 감소함을 알 수 있다.

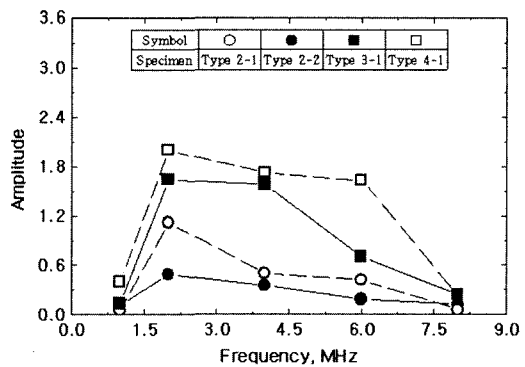


Fig. 8 Relationship between amplitude and frequency by Fourier transform in dissimilar materials

4.3 주파수와 음압투과율의 관계

푸리에 변환에 의한 주파수 응답으로 나타낸 동종 및 이종 접착부재의 접착 계면에서의 주파수 범위를 적용하여 초음파 탐상 특성에 따른 최적의 주파수 영역을 설정하였다.

4.3.1 동종 접착부재인 경우

Fig. 9는 Type 1-2에서 수신된 초음파 파형을 주파수 변화에 따라 나타낸 것이다. 주파수가 커질수록 음압이 증가하고 분해능이 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 7의 결과를 토대로 비결정질인 아크

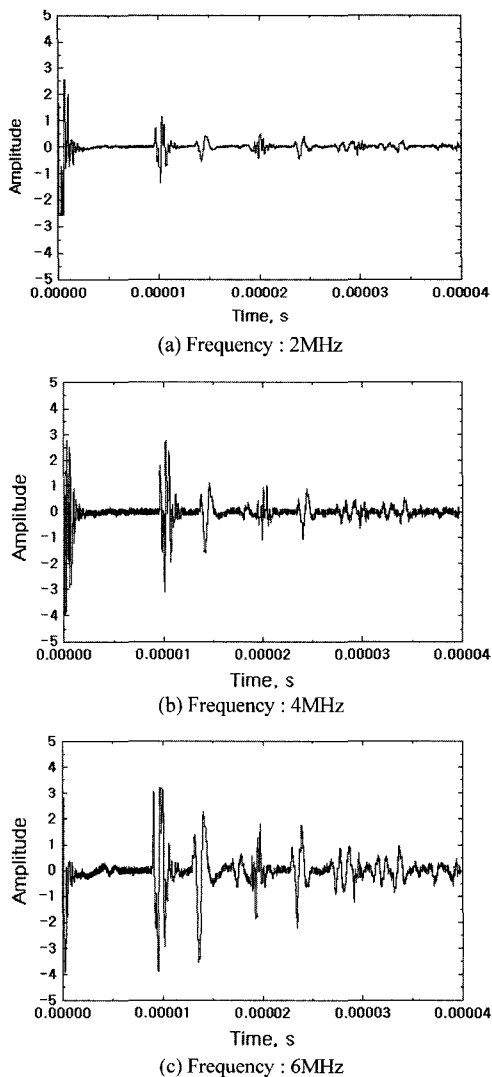


Fig. 9 Ultrasonic waveform from homogeneous adhesively bonded components (Type 1-2)

릴 수지를 시험편으로 한 Type 1-1에 대한 접착층의 두께와 주파수의 변화에 따른 음압투과율을 나타낸 것이다. Type 1-1은 접착체로 사용된 아크릴 수지와 접착재로 사용된 세멘다인 1500과의 음향 임피던스의 차가 작기 때문에 접착체와 접착층에서 초음파 산란은 미미하고, 주파수가 4~6MHz에서는 이론값과 잘 일치한다.

Fig. 11은 결정질인 알루미늄 합금을 시험편으로 한 Type 1-3에 대한 접착층의 두께와 주파수 변화에 따른 음압투과율을 나타낸 것이다. Type 1-3은 접착재로 사용된 알루미늄 합금과 접착재로 사용된 세멘다인 1500과의 음향 임피던스의 차가 크기 때문에 초음파 산란은 Type 1-1에 비해 크게 나타났고, 주파수가 높을수록 음압투과율의 분포는 이론값과 잘 일치함을 알 수 있다.

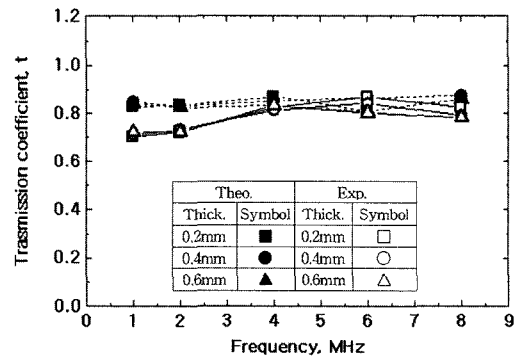


Fig. 10 Relationship between frequency and transmission coefficient according to adhesive thickness (Type 1-1)

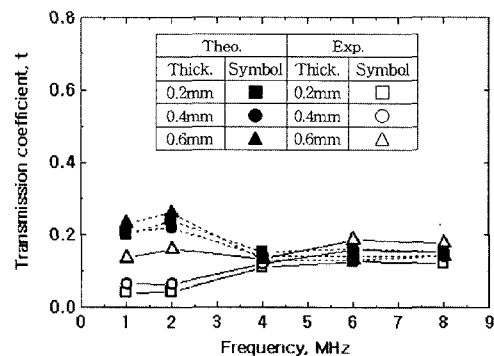
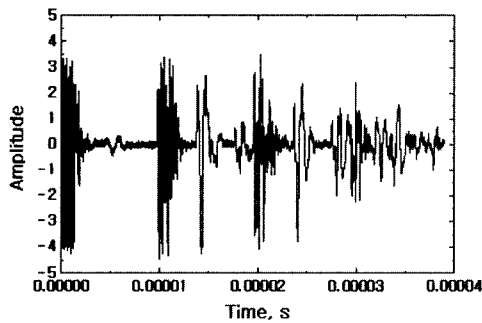


Fig. 11 Relationship between frequency and transmission coefficient according to adhesive thickness (Type 1-3)

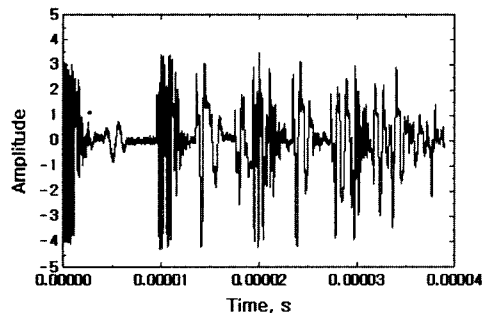
4.3.2 이종 접착부재인 경우

Fig. 12는 Type 3-1에서 수신된 초음파 파형을 주파수 변화에 따라 나타낸 것이다. 동종 접착부재와는 반대로 주파수가 작을수록 분해능이 향상되고 커질수록 산란 파형이 크게 나타남을 알 수 있다.

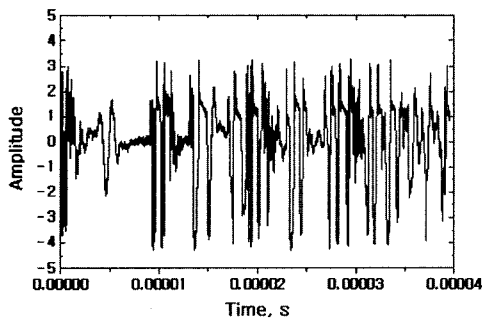
Fig. 13과 Fig. 14는 Fig. 8의 주파수 대역을 토대로 Type 2-2와 Type 3-2에 대한 접착층의 두께에 따른 음압투과율을 주파수 변화에 따라 나타낸 것이다. 주파수가 높을수록 산란으로 인해 음압투과율의 값이 작고, 주파수가 낮을수록 음압투과율이 크게 나타



(a) Frequency : 2MHz



(b) Frequency : 4MHz



(c) Frequency : 6MHz

Fig. 12 Ultrasonic waveform from dissimilar adhesively bonded components (Type 3-1)

난다. 이종 접착부재는 주파수가 높을수록 파장이 짧기 때문에 접착부재 내에서 민감하게 반응하고 산란파가 많이 발생하여 초음파 탐상 특성을 감지하는데 어려움이 있다. 이와는 반대로 낮은 주파수 영역에서는 산란파가 작게 발생하므로 초음파 탐상 특성을 감지하는데 적합한 조건임을 알 수 있다.

Fig. 15는 음압투과율의 유도식에 대한 값과 푸리에 변환 결과를 초음파 탐상 특성 시험에 적용하여 측정 결과를 음향 임피던스 비의 변화에 따른 주파수 설정값을 도시한 것이다. 동종 및 이종 접착부재의 경우에는 산란에 대한 주파수 인자가 음압투과율에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, 접착부재에 대한 주파수 범위가 설정된 동종 접착부재의 경우에는 낮은 주파수보다는 산란이 적은 4~6MHz의 주파수 영역이 적합하다.

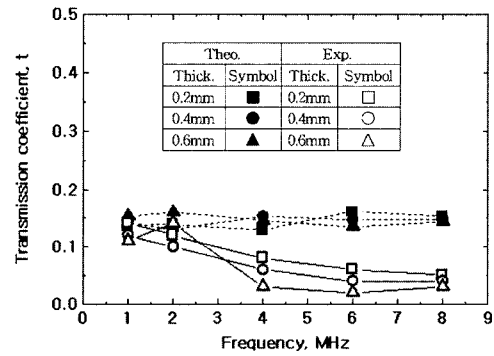


Fig. 13 Relationship between frequency and transmission coefficient according to adhesive thickness (Type 2-2)

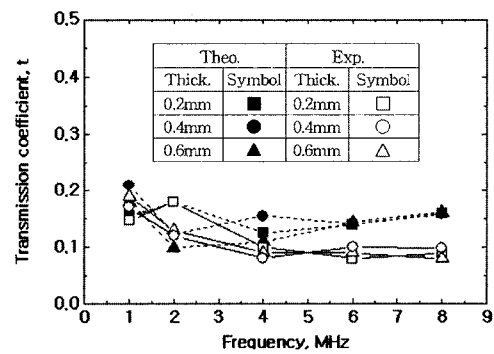


Fig. 14 Relationship between frequency and transmission coefficient according to adhesive thickness (Type 3-2)

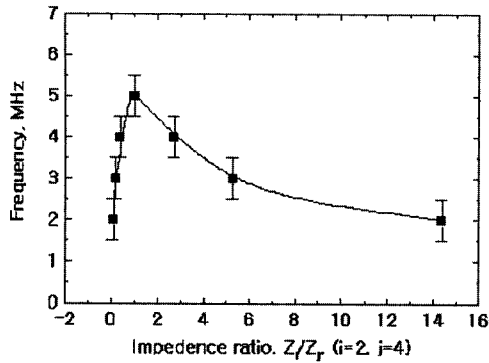


Fig. 15 Establishment of frequency by variation of impedance ratio

이종 접착부재는 동종 접착부재와 달리 음향 임피던스의 차로 인해 높은 주파수 범위에서는 산란이 크기 때문에 낮은 주파수 영역인 2~4MHz가 초음파 탐상 특성에 최적의 조건으로 설정이 가능하다.

5. 결론

접착부재에 대한 음압투과율의 식을 유도하고 접착부재 계면에 대한 초음파 탐상 특성을 검토한 후, 접착부재 시험편을 제작하여 접착계면에 대한 초음파 탐상 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 접착부재의 계면에 대한 초음파 탐상 특성에 영향을 미치는 인자로는 음향 임피던스, 접착체의 종류, 접착층의 두께, 주파수 등이 있고, 이를 토대로 음향 임피던스 비의 변화에 따른 음압투과율 및 주파수의 상호관계를 검토하였다.
- 2) 접착부재의 조합에 의한 재료 물성치 차이에 의해 발생하는 초음파 탐상 특성은 외부적 산란에 대한 주파수 인자가 음압투과율에 크게 영향을 미치기 때문에 주파수 대역을 변화시켜 초음파 산란의 보정이 가능하다.
- 3) 동종 및 이종 접착부재에 대한 초음파 산란 보정을 위한 주파수 영역의 최적 조건 설정 방법을 제시하였다. 그 결과 본 연구의 경우 동종 접착부재에 대한 초음파 산란 보정을 위한 주파수 대역은 4~6MHz 이고, 이종 접착부재의 경우는 2~4MHz 영역이 최적 조건이다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이

루어졌음.

References

- 1) R. A. Kline, C. P. Hsiao, "Nondestructive Evaluation of Adhesively Bonded Joint," Trans. ASME, July, pp.214-217, 1986.
- 2) H. Ping, "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using both Transmitted and Reflected Pulses," Ultrasonics, Vol.39, pp.27-32, 2001.
- 3) N. Y. Chung, S. I. Park, M. D. Lee, C. H. Park, "Ultrasonic Detection of Interface Crack in Adhesively Bonded DCB Joints," Int'l J. of Automotive Technology, Vol.3, No.4, pp.157-163, 2002.
- 4) W. J. Xu, M. Ourak, "Angular Measurement of Acoustic Reflection Coefficient for Substrate Materials and Layered Structures by V(Z) Technique," NDT&E International, Vol.30, pp.75-83, 1997.
- 5) R. A. Kline, "Measurement of Attenuation and Dispersion Using an Ultrasonic Spectroscopy Technique," J. Acoust. Soc. Am, Vol.76, No.2, pp.498-504, 1983.
- 6) Z. Derouiche, "Ultrasonic Characterization of Heterogeneous Materials Using a Stochastic Approach," J. Acoust. Soc. Am, Vol.97, No.4, pp.2304-2315, 1996.
- 7) S. Biwa, Y. Watanabe, "Analysis of Wave Attenuation in Unidirectional Viscoelastic Composites by a Differential Scheme," Composite Science and Technology, Vol.63, pp.237-247, 2003.
- 8) N. N. Kishore, I. Sridhar, "Finite Element Modelling of the Scattering of Ultrasonic Waves by Isolated Flaws," NDT&E International, Vol.33, pp.297-305, 2000.
- 9) M. O. Si-Chaib, H. Djelouah, M. Bocquet, "Application of Ultrasonic Reflection Mode Conversion Transducers in NDE," NDT&E International, Vol.33, pp.91-99, 2000.
- 10) C. Pecorari, "Attenuation and dispersion of Rayleigh Waves Propagation on a Crack Surface : an Effective Field Approach," Ultrasonic, Vol.38, pp.754-760, 2000.