

이종 접합부재의 두께 변화에 따른 초음파 산란 보정에 의한 계면균열 길이의 측정

정 남 용*

송실대학교 기계공학과

Measurement of Interfacial Crack Length by Ultrasonic Scattering Compensation Depending on Thickness Variations of Bonded Dissimilar Components

Nam Yong Chung*

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

(Received 12 July 2005 / Accepted 26 September 2005)

Abstract : In this paper, the compensation of ultrasonic scattering on interface crack depending on thickness variations of Al/Epoxy bonded dissimilar components was applied to improve measuring accuracy by using ultrasonic attenuation coefficient. The optimum conditions of theoretical value and experimental measuring accuracy by the ultrasonic method in Al/Epoxy bonded dissimilar components have been investigated. From the experimental results, the measurement method of interfacial crack lengths by using ultrasonic attenuation coefficient was proposed and discussed. After the ultrasonic scattering compensation depending on thickness variations of bonded dissimilar components was carried out, the measuring accuracy of interfacial crack length was improved by 5%.

Key words : Bonded dissimilar components(이종 접합부재), Double-cantilever beam(이중 외팔보), Interface crack(계면균열), Transmission coefficient(통과율), Ultrasonic attenuation coefficient(초음파 감쇠계수), Ultrasonic scatter(초음파 산란), Ultrasonic test(초음파 탐상)

1. 서 론

신소재의 개발과 함께 재료를 특수한 목적에 사용하기 위하여 세라믹/금속 접합을 비롯하여 수지/금속 접합, 반도체 패키지, 브레이징, 마찰용접, 납땀, 그리고 코팅 등과 같이 이종재료를 접합한 이종 접합부재의 사용이 각종 산업분야에서 활용되고 있어 이들 제품의 안전성을 확보하기 위한 비파괴검사의 필요성이 대두되고 있다. 특히 이종재료의 접합계면은 재료의 성질 및 형상의 특이성으로 인하

여 응력 집중이 발생하여 강도저하는 물론, 계면균열이 발생하여 파단에 이르게 된다.

이러한 접합계면의 미시적 구조의 복잡성과 계면 특성으로 인하여 이종 접합부재에 대한 계면균열을 정밀도 높게 측정하기 위해서는 접합계면의 초음파 산란 보정은 매우 중요하다.¹⁻⁸⁾

균질재에 대한 비파괴 검사의 적용은 많은 발전을 거듭해 왔지만,^{9,10)} 이종 접합부재의 계면균열 검출에 대한 체계적인 비파괴검사의 연구는 미진한 상태이다. 접합부재의 비파괴 검사에 대한 연구는 Kline 등¹⁾에 의한 접촉이음의 비파괴 평가가 있다.

*Corresponding author. E-mail: nychung@hanmail.net

또한 Ping 등²⁾은 투과 및 반사 펄스를 이용한 산란과 감쇠의 측정에 대한 연구를 하였고, Derouiche 등³⁾은 확률적 접근에 의한 이종재료의 초음파 특성을 연구하였다. 그러나 이종재 접합이음의 초음파 산란보정에 의한 계면균열 길이의 측정에 대한 연구 결과는 보고 되지 않고 있다.

이종 접합부재의 계면균열 길이의 측정에 초음파 탐상을 적용할 경우, 계면균열 탐상에 미치는 접합 계면의 영향과 탐상 주파수의 영향, 접합체의 밀도와 초음파 속도 즉, 음향 임피던스 차이에 의한 초음파 산란이 발생하여 음압이 현저하게 감소한다.^{2,5)} 이러한 접합계면에 대한 초음파 산란의 보정은 이종 접합부재의 초음파 탐상의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금(AI5052)과 에폭시 수지(Epoxy resin)를 몰딩 접합(Al/Epoxy)시킨 이종 접합부재의 DCB(double-cantilever beam) 시험편을 제작하였다. 접착매질, 접합체와 접착 층으로 조합된 4 개층에 대한 음압통과율 식을 유도하여 계면균열에 대한 초음파 산란의 영향 인자를 도출한다. 또한, 유도된 음압통과율 식과 이종 접합부재의 두께 변화에 따른 계면균열에 대한 초음파 산란·보정을 검토한 후, 음압 감소에 따른 초음파 탐상에 의한 산란 보정 방법과 계면균열의 측정방법을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편의 형상 및 치수

이종 접합부재의 두께 변화에 따른 초음파 산란 보정에 의한 계면균열 길이를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 시험편을 제작하였다. 접합체는 균질재료 알루미늄 합금(AI5052)과 에폭시 수지(Cemadine 1500)를 사용하고, 균열의 길이 $a=10 \sim 90$ mm 범위에서 임의의 길이로 변화시키고, 전체 길이 $L=135$ mm로 하였다. 시험편 재료의 물성치 및 초음파 특성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2.2 시험편의 제작

알루미늄 판재를 소정의 치수로 밀링가공하고,

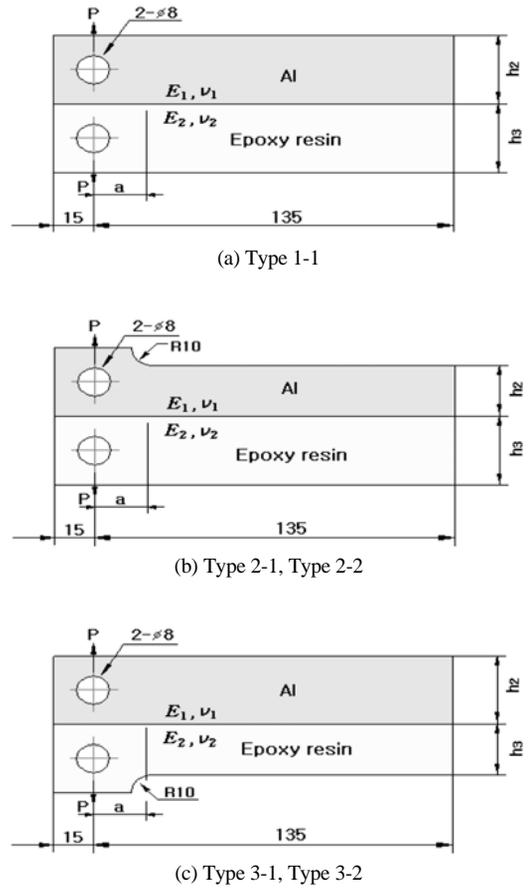


Fig. 1 Shape and dimension of DCB specimen of Al/Epoxy bonded dissimilar materials

Table 1 Material properties of DCB specimen

Material properties Specimen materials	Density ρ (103kg/m ³)	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Aluminum	2.70	65.56	0.32
Epoxy resin	1.30	3.165	0.37

Table 2 Ultrasonic properties of DCB specimen

Material properties Specimen materials	Velocity, (m/s) C_L	Impedance, Z (106kg/m ² s)
Aluminum	6,260	16.90
Epoxy resin	2,800	3.70
Couplant Glycerin	1,880	2.40

접합 부위를 #220의 샌드페이퍼로 연마한 후 아세톤으로 세척하였다. 에폭시 수지는 노 내의 온도가 158°C에서 주재인 아랄다이트(Araldite : Ciba)를 별도로 용해하여 주재와 경화제를 10:3의 중량비로 혼합한 후 알루미늄 합금의 접합체와 몰딩하여 이종 접합부재의 시험편을 제작하였다.

시험편의 몰딩 접합은 전기로 내에서 유리판 위에 셀로판지를 덮고 실리콘으로 둘레를 실링한 후 준비된 알루미늄 시험편을 올려놓고 에폭시 수지로 몰딩 접합하였다. 이때, 전기로 내의 온도를 158°C로 유지시켜 24시간 경화시킨 후 노 안에서 서서히 냉각하였다. 예비균열은 테플론 필름을 삽입하여 몰딩 성형하였다.

2.3 실험방법

만능재료시험기(Hounsfield H10KT)를 사용하여 편 하중을 작용시키고, 변위제어 방식으로 하중속도는 0.05 mm/min으로 하였다. 하중-하중점 변위선도는 X-Y 레코더로 기록하였고, 하중점의 변위는 클립 게이지를 사용하여 측정하였다. 각 시험편의 계면균열 길이에 대한 초음파 에코를 측정하여 감쇠계수를 구하였다. 초음파 탐상기(Sitescan 240)와 탐촉자는 진동자의 지름이 각각 5 mm와 10 mm이고, 주파수는 4 MHz인 수직탐촉자를 사용하였다. 탐촉자의 이동은 1/1000 mm까지 측정이 가능한 이동식 현미경을 사용하였다. 탐상감도는 BS(British Standard) 블록 A4 대비시험편을 사용하여 감도를 80%로 맞추고, 접촉매질은 글리세린을 사용하였다. 이때 수직탐상에 의해 접합체 및 계면균열에서 발생하는 초음파 산란은 초기음압 즉, 대비시험편에서의 음압과 탐상에서 발생하는 음압의 차를 계산하고, 각각의 계면균열에서 발생하는 초음파 산란 및 보정을 비교하였다.

3. 접합부재에 대한 음압통과율

3.1 매질의 조합이 2, 3개 층인 경우

초음파가 접합부재에 수직으로 통과하는 문제는 각 매질의 밀도와 초음파 속도에 의한 음향 임피던스를 고려하여야 한다.

Fig. 2는 초음파가 시험편에 수직입사 할 때의 형

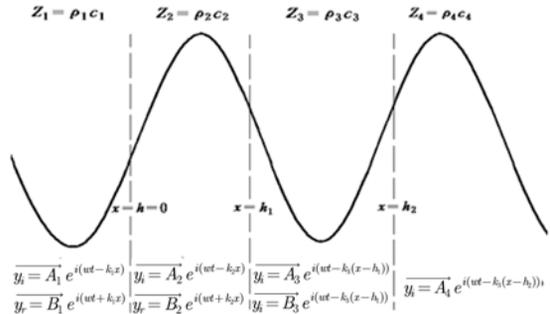


Fig. 2 Diagram of incident and reflected ultrasonic waves on interfaces of dissimilar materials

상을 나타낸 것이다. 이때 조합되는 재료의 수가 2개 층 즉, 음향 임피던스가 Z_1, Z_2 인 경우와 3개 층에서의 음향 임피던스가 Z_1, Z_2, Z_3 일 때, 음압통과율은 각각 다음 식과 같이 된다.¹⁾

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

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

여기서, h 는 접합 층의 두께이고, $k_2 = 2\pi/\lambda$, $\lambda = C_L/f$, λ 는 파장, C_L 는 재료의 종파속도, 그리고 f 는 주파수를 의미한다.

3.2 매질의 조합이 4개 층인 경우

만일 접착이음에 대한 초음파를 탐상한다면 접착체와 접착 층 및 접촉매질 층까지를 고려해야 하므로 조합되는 재료의 층수는 4개가 되고, 음향 임피던스는 각각 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 로 된다. 음향 임피던스 Z_1 과 Z_2 에서 경계층 $x=0$ 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 같다면 다음 식과 같이 표시된다.

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

경계층 $x=0$ 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 경계층 $x = h$ 인 경우 식 (3)과 식 (4)의 유도 과정을 적용하여 정리하면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

또한, 음향 임피던스 Z_3 과 Z_4 에서 경계층이 $x = h_1$ 인 경우도 같은 방법으로 식 (3)과 식 (4)의 유도 과정을 적용하여 정리하면, 다음 식과 같이 표시된다.

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

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

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

식 (6), 식 (7)에 식 (9)와 식 (10)을 각각 대입하고 이때 구해진 값을 식 (4)에 다시 대입하여 정리하면, 조합되는 매질의 수가 4개 층인 경우 음압통과율은 다음 식과 같이 유도된다.

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

여기서,

$$B^* = (Z_1/Z_2 + 1) \cos k_2 h \cdot \cos k_3 (h_1 - h),$$

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

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

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

계수 $Z_1 = Z_2$, $Z_3 = Z_4$ 와 $h = h_1$, 또는 $h = 0$ 이라 가정하면 C^* , D^* , E^* 는 0이 되어 식 (1)과 같이 2개 층에 대한 음압통과율의 식으로 된다. 또한, 식 (11)

에서 $Z_3 = Z_4$ 와 $h = h_1$ 이라 가정하면, D^* 와 E^* 는 0이 되어 식 (2)와 같은 3개 층에 대한 음압통과율의 식으로 표시된다.

3.3 초음파 감쇠계수

초음파가 매질에 입사할 때 감쇠로 인한 음압의 변화는 지수 함수적으로 감소한다. 실제의 초음파 탐상에서 초음파가 매질에 입사할 때 접촉매질에 의해 탐촉자와 시험편 사이에 일정 두께의 박막이 형성되므로, 이러한 접촉매질에 의한 감쇠와 접합체의 두께 변화에 따라 발생하는 감쇠를 모두 고려한 감쇠계수(α)는 다음 식으로 표시된다.²⁾

$$\alpha = 20 \frac{1}{4h} \log [r_b^2 \cdot r_c^2 \cdot |x^* - y^*|] \quad (12)$$

여기서, r_b 는 접합체에서의 음압반사율, r_c 는 접촉매질에서의 음압반사율, $x^* = P_n / (P_{n+1} - P_{n+2})$, $y^* = (P_{n+1} - P_{n+2}) / (P_{n+2} - P_{n+3})$ 이다. 또한, P_n 은 거리 n 만큼 전반사 하였을 때의 음압이고, h 는 접합 시험편의 높이이다.

식 (12)는 선형 초음파의 관점에서 해석한 것으로 균질재의 초음파 감쇠계수를 결정하는데 사용되며, 본 실험에서도 식 (12)를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 주파수와 음압통과율의 관계

Fig. 3은 식 (11)에 의해 계산되어진 음압통과율 값과 푸리에 변환에 의한 주파수 응답 결과를 음향 임피던스의 비에 따라 주파수 설정값을 나타낸 것이다. 동종 접착부재 및 이종 접착부재는 산란에 의한 주파수가 음압통과율에 영향을 크게 미치기 때문에 Fig. 3에서 동종 접착부재($Z_i/Z_j = 1$)의 경우 낮은 주파수 보다는 산란이 적은 4~6 MHz로 설정하는 것이 초음파 탐상의 최적조건으로 되고, 이종 접착부재 ($Z_i/Z_j < 1$, $Z_i/Z_j > 1$)는 음향 임피던스의 차로 인하여 높은 주파수 범위에서는 산란이 크므로 낮은 주파수 영역인 2~4 MHz로 설정하는 것이 최적조건으로 판단된다.

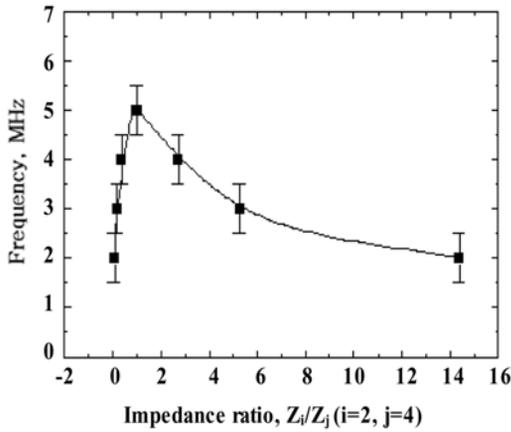


Fig. 3 Establishment of frequency by variation of impedance ratio

4.2 이종 접합부재 - 매질층이 없는 경우

음압은 음파의 세기를 나타내는 것으로서 매질에 대한 음압의 계산은 초음파의 탐상 정밀도와 매우 밀접한 관계가 있다.

Fig. 4는 Fig. 1(a)의 Type 1-1 시험편에 대한 이종 접합부재의 매질층을 고려하지 않은 재료의 조합이 2개 층일 경우 음압통과율에 대한 식 (11)을 검증하기 위하여 이종 접합체 고유의 음향 임피던스 비와 음압통과율에 대한 이론 및 실험 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 식 (11)과 실험결과는 서로 잘 일치하고, 음향 임피던스 비의 증가에 따라 음압통과율의 값도 곡선적으로 증가한다.

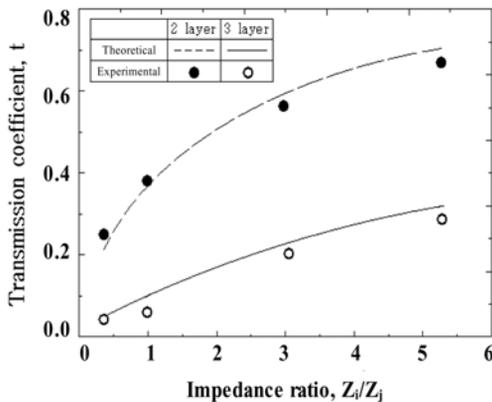


Fig. 4 Relationship between transmission coefficient and impedance ratio (Type 1-1)

4.3 이종 접합부재 - 매질층이 있는 경우

매질층을 고려한 3개 층의 조합에 대해 유도된 식 (11)에서 계산된 이론 음압통과율과 음향 임피던스비의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 접촉 매질층을 고려하지 않은 경우와 비교하면, 매질층에 대한 음향 임피던스의 차이로 발생하는 초음파 산란에 의해 음압통과율은 전체적으로 감소한다. 이러한 현상은 음향 임피던스 비가 접촉 매질층과 접합계면에서 발생하는 초음파 산란에 영향을 미치는 것을 의미하고, 접촉 매질층에 대한 초음파 산란의 보정은 초음파 탐상의 정밀도를 향상시키기 위해서 중요하다.

4.4 접합체 두께 비와 초음파 감쇠계수

Fig. 5는 계면균열이 없는 경우 접합체의 두께 비 h_2/h_3 의 변화에 따른 초음파 감쇠계수를 나타낸 것이다. 접합체의 두께 비가 증가할수록 초음파 감쇠계수가 약간 변화하는 것은 에폭시 수지의 두께 감소에 의한 접합계면의 영향을 더욱 강하게 받기 때문인 것으로 판단되며, 초음파 탐상에 대한 전반적인 정밀도에는 별 영향을 미치지 않는다.

또한, Fig. 6은 각 시험편의 접합체 두께 비에 따른 초음파 감쇠계수를 각각의 균열길이에 대해서 나타낸 것이다. 균열길이의 변화에 따라 접합체의 두께 비가 $h_2/h_3=1$ 인 경우를 중심으로 초음파 감쇠계수는 좌우로 서로 감소하여 일정값으로 된다.

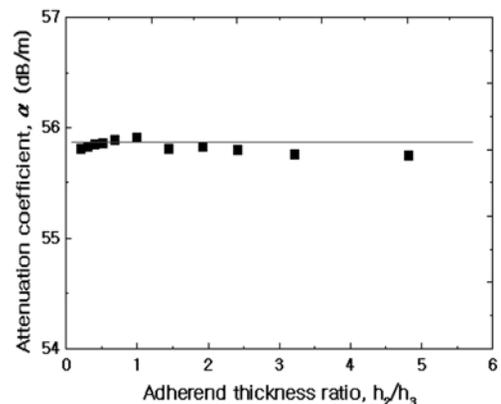


Fig. 5 Relationship between attenuation coefficient and adherend thickness ratio (a=0)

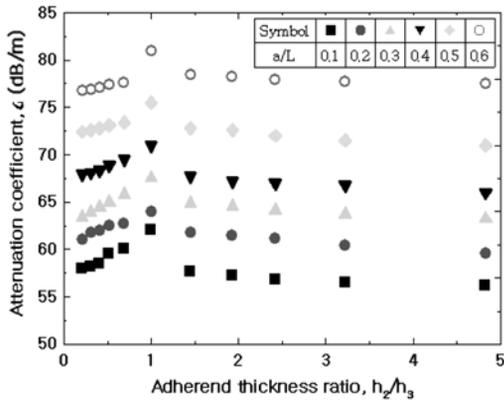


Fig. 6 Relationship between attenuation coefficient and adherend thickness ratio

4.5 접합체의 두께 비와 초음파 산란 보정

Fig. 7은 접합체의 두께 비에 따라 발생하는 음압 반사율과 통과율의 관계를 나타낸 것이다. 접합체의 두께 비 $h_2/h_3 = 1$ 을 중심으로 음압반사율과 통과율은 반비례 관계를 나타낸다. 만약, 접합체 및 접합층에서 초음파가 이상적으로 전반사되었다고 가정하면 음압반사율과 통과율의 합이 1(100%)이 되어야 한다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 1이 되지 않는다. 이러한 현상은 초음파가 접촉 매질층, 접합체, 또는 접합층을 투과할 때 내부에서 산란이 발생하는 것을 의미한다.

Fig. 8은 접합체의 두께 비에 따른 산란계수의 변화를 나타낸 것이다. 산란계수는 접합체의 두께

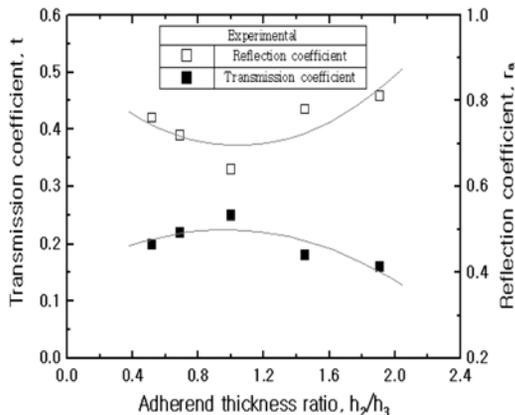


Fig. 7 Relationship between reflection and transmission coefficient

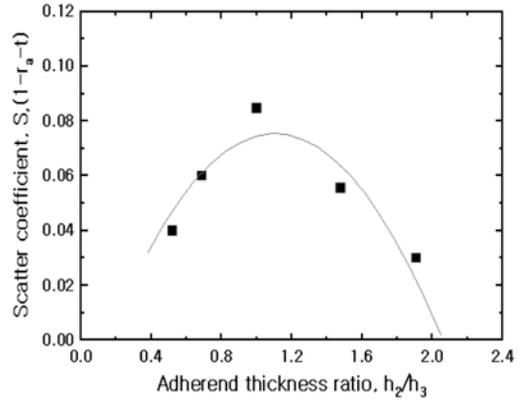


Fig. 8 Relationship between adherend thickness ratio and scatter coefficient

비($h_2/h_3 = 1$)를 기준으로 좌우로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 접합체의 두께 변화에 따라 발생하는 산란에 따른 초음파 보정은 접합체에서 반사되는 에코 비, 접합체의 두께 비와 초음파 산란 계수를 이용하여 접합체의 두께 비에 따른 초음파 산란 보정계수 C_f 의 관계를 다음 식과 같이 제시한다.

$$C_f = \left(\frac{H_1/H_2 - S}{h_2/h_3} \right) \times 2 \quad (13)$$

여기서 H_1, H_2 는 1회 및 2회 반사 에코의 진폭, S 는 초음파 산란계수, h_2 와 h_3 는 각 접합체의 두께를 나타낸다.

4.6 계면균열길이와 초음파 감쇠계수의 관계

Fig. 9는 계면균열 길이에 따른 초음파 감쇠계수와 에코 비의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7과 Fig. 8의 관계를 고려하여 초음파 보정 값을 적용하여 계면균열 길이에 대한 초음파 감쇠계수를 측정된 결과이다. 균열길이가 증가할수록 초음파 감쇠계수도 증가하지만, 초음파 에코는 균열길이의 증가에 따라 상대적으로 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 접합체의 음향 임피던스 차에 의한 산란 때문에 초음파 감쇠계수는 증가하는 반면, 초음파 에코의 비는 감소한다.

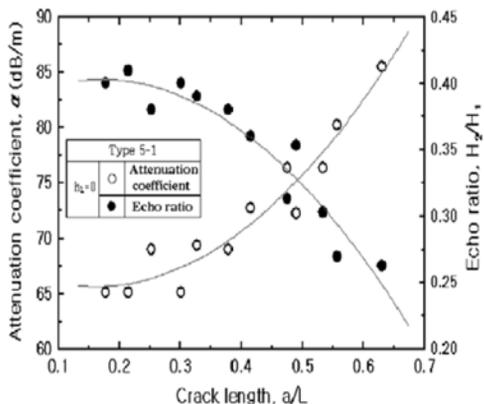


Fig. 9 Relationship between attenuation coefficient and echo ratio versus interfacial crack length

4.7 접합체의 두께 비와 초음파 감쇠계수

Fig. 10은 균열길이가 일정할 때 접합체의 두께 변화에 따른 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 나타낸 것이다.⁸⁾ 접합체의 비가 $h_2/h_3 < 1$ 와 $h_2/h_3 > 1$ 인 경우 접합체 두께의 영향으로 $h_2/h_3 = 1$ 을 기준으로 좌우의 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률 G 는 감소한다.

이러한 현상은 접합체의 두께 비가 1보다 증가하거나 감소할 때 초음파의 음압통과율도 이에 따라 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

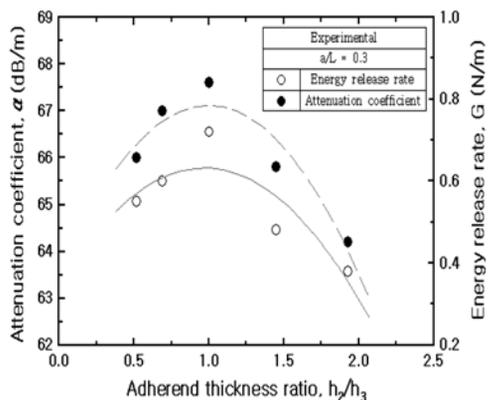


Fig. 10 Relation between attenuation coefficient energy release rate and adherend thickness

4.8 이중 접합부재에 대한 계면균열의 측정

접합체에 대한 컴플라이언스 C 와 에너지 방출률 G 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$C = \frac{\delta}{P} \tag{14}$$

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \tag{15}$$

여기서 P 는 작용하중, δ 는 하중점 변위, B 는 시험편의 두께이고, a 는 균열의 길이이다.

Fig. 11은 이중 접합부재에 대한 초음파 산란에 따른 보정 전·후의 컴플라이언스 측정결과와 CCD 카메라에 의한 측정결과를 비교하여 정밀도를 검증하였다. 초음파 산란을 보정하기 전에는 CCD 카메라에 의해 측정된 실제균열의 길이보다 과소평가되었고, 보정후에는 실제 균열길이와 5% 이내의 정밀도로 잘 일치하였다. 따라서 이중 접합부재에 대한 초음파 산란을 보정을 한 후 계면균열의 길이를 측정하는 결과는 보정하기 전보다 탐상 정밀도가 5% 향상되었다.

Fig. 12는 Fig. 9와 같은 방법으로 각 시험편에 대한 초음파 보정 값을 적용하여 초음파 감쇠계수에 대한 계면균열 길이의 측정결과를 나타낸 것이다. 이중재 접합 시험편인 Type 1-1을 기준으로 Type 2-1과 Type 2-2는 동일한 균열길이에 대해서 접합체의 두께 비(h_2/h_3)가 감소할수록 초음파 감쇠계수는 증가한다. 또한, Type 3-1과 Type 3-2의 경우는 균열길이가 같을 때 접합체 두께 비의 증가에 따라 초음파 감쇠계수도 증가한다.

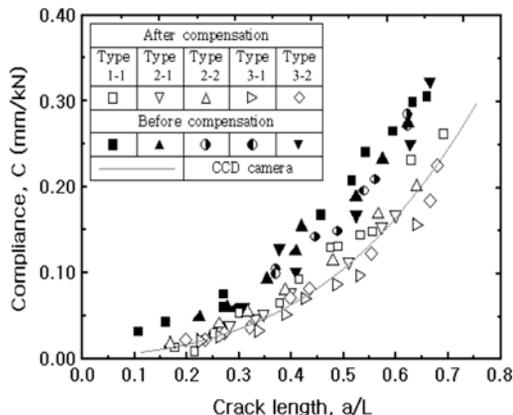


Fig. 11 Comparison of measuring accuracies before and after compensation

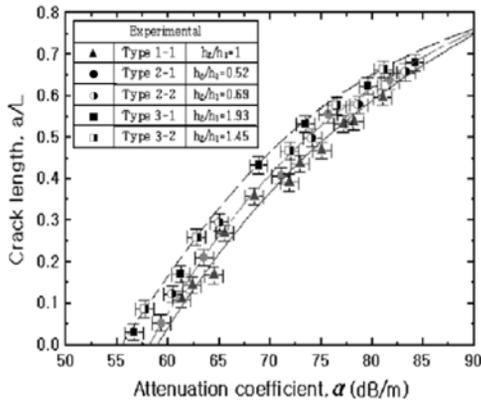


Fig. 12 Relationship between crack length and attenuation coefficient on the bonded dissimilar materials

따라서 균열의 발생 및 진전에 따른 초음파 감쇠 계수의 측정이 가능하다면 계면균열 길이의 예측이 가능하고, 에너지 방출률과 이들의 상호관계를 파악할 수 있다. 이들의 상호관계를 이용하여 균열길이와 초음파 감쇠계수의 관계를 나타내면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{a}{L} = -0.0005\alpha^2 + 0.1043\alpha - 4.1884 \text{ (Type1-1)}$$

$$\frac{a}{L} = -0.005\alpha^2 + 0.0954\alpha - 3.8529 \text{ (Type2-1, 2-2) (16)}$$

$$\frac{a}{L} = -0.005\alpha^2 + 0.0947\alpha - 3.7179 \text{ (Type3-1, 3-2)}$$

따라서 초음파 감쇠계수의 실험적 측정이 가능하다면 식 (16)을 이용하여 계면균열의 길이를 예측할 수 있다.

5. 결론

이종 접합부재에 대한 음압통과율의 식을 유도하고, 계면균열의 초음파 탐상에 대한 특성을 검토한 후, 이종접합체의 두께 변화에 따른 초음파 산란 보정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이종 접합부재의 계면에 대한 초음파 탐상 특성에 영향을 미치는 인자로는 음향 임피던스, 접합체의 종류, 주파수 등이 있고, 이들을 토대로 음향 임피던스 비의 변화에 따른 음압통과율 및 주파수의 상호관계를 파악하였다.

- 2) 이종 접합부재는 음향 임피던스의 차로 인해 높은 주파수 범위에서는 산란이 크기 때문에 주파수 영역을 2~4 MHz로 설정하는 것이 초음파 탐상의 산란을 보정하는 최적조건으로 된다.
- 3) 이종 접합부재의 두께 비에 따른 산란계수는 접합체의 두께 비 $h_2/h_3 = 1$ 를 기준으로 좌우로 증가, 또는 감소하고, 이러한 현상을 이용하여 접합체의 두께 비에 따른 초음파 산란 보정 방법을 제시하였다.
- 4) 이종 접합부재의 두께 변화에 따른 초음파 산란 보정 값을 초음파 탐상에 적용하면 분해능이 향상되고, 보정후의 측정 정밀도는 보정전보다 5% 향상된다.
- 5) 이종 접합부재에 대한 초음파 감쇠계수의 측정이 가능하다면, 이것에 상응하는 계면균열 길이를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- 1) R. A. Kline and C. P. Hsiao, "Nondestructive Evaluation of Adhesively Bonded Joint," J. of Engineering Materials and Technology, Vol.18, No.1, pp.214-217, 1986.
- 2) H. Ping and Z. Jun, "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using Both Transmitted and Reflected Pulses," Ultrasonic, Vol.39, No.1, pp.27-32, 2001.
- 3) Z. Derouiche, C. Dlebarre, "Ultrasonic Characterization of Heterogeneous Materials Using a Stochastic Approach," J. Acoust. Soc. Am., Vol.97, No.4, pp.2304-2315, 1995.
- 4) N. Y. Chung, S. I. Park and M. D. Lee, "Ultrasonic Detection of Interface Crack in Adhesively Bonded DCB Joints," Int. J. Automotive Technology, Vol.3, No.4, pp.157-163, 2002.
- 5) N. Y. Chung and S. I. Park, "Measurement of Interfacial Crack Length by Ultrasonic Attenuation,"

- ation Coefficients on Adhesively Bonded Components,” Transactions of KSAE, Vol. 12, No.1, pp.130-137, 2004.
- 6) I. M. Daniel and H. J. Chun, “Response of Ultrasonic Back Scattered Energy and AE Characteristics on the Progressive Damage of Crossply Composite Laminates,” Trans. of KSME, Vol.24, No.5, pp.1084-1092, 2000.
 - 7) S. J. Song, J. U. Choe and H. J. Kim, “A Study on Elastic Wave Propagation for Nondestructive Evaluation of Composite Structures-An Experimental Approach,” Trans. of KSME, Vol.22, No.6, pp.978-989, 1998.
 - 8) N. Y. Chung and S. I. Park, “Detection of Interfacial Crack Length by Using Ultrasonic Attenuation Coefficients on Adhesively Bonded Joints,” Int. J. Automotive Technology, Vol.5, No.4, pp.303-309, 2004.
 - 9) N. N. Kishore, I. Sridhar and N. G. R. Iyengar, “Finite Element Modelling of the Scattering of Ultrasonic Waves Isolated Flaws,” NDT&E International, Vol.33, No.5, pp.297-305, 2000.
 - 10) P. Wilcox, M. Lowd and P. Cawley, “The Effect of Dispersion on Long range Inspection Using Ultrasonic Guided Waves,” NDT&E Int., Vol.34, pp.1-9, 2001.