

## 이종 접합부재의 두께 변화에 따른 계면균열의 초음파 산란 보정

박성일<sup>†</sup> · 정남용\* · 진유희\*\*

### Ultrasonic Scatter and Compensation of Interfacial Crack due to Thickness Variation of Dissimilar Bonded Components

Sung Il Park, Nam Yong Chung, Yoon Ho Jin

**Key Words:** Dissimilar Bonded Components(이종접합부재), Double-Cantilever Beam(이중 외팔보), Interfacial Crack(계면균열), Transmission Coefficient(투과율), Ultrasonic Attenuation Coefficient(초음파감쇠계수), Ultrasonic Test(초음파 탐상)

#### Abstract

In this paper, the compensation of interfacial scatter due to adhesive layer and adherend thickness ratio variation was applied to improve measuring precision by calculating ultrasonic attenuation coefficient in the Al/Epoxy dissimilar bonded components. The optimum condition of theoretical value and experimental measuring accuracy by the ultrasonic method in the Al/Epoxy dissimilar bonded components have been investigated. From the experimental results, we proposed a measurement method of the interfacial crack lengths by the ultrasonic attenuation coefficient and discussed it.

#### 1. 서 론

구조접합이음은 경량화, 고기능화, 내구성에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있는 장점으로 인하여 자동차, 항공기, 선박 및 우주선은 물론, 반도체, 스포츠 용품 등 각종 산업분야에서 그 활용범위가 날로 증가하고 있어 이들 제품의 안전성을 확보하기 위한 비파괴검사의 필요성이 대두되고 있다. 특히 이종재료의 접합계면은 재료의 성질 및 형상의 특이성으로 인하여 응력 집중이 발생하여 강도저하는 물론, 계면균열이 발생하여 파단에 이

르게 된다. 이러한 미시적 구조의 복잡성과 특이성으로 인하여 체계적인 비파괴검사의 연구가 미진한 상태이다. R. A. Kline 등<sup>(1)</sup>은 접착이음에 대한 비파괴 평가에 대해 연구하였고, Z. Derouiche<sup>(2)</sup>는 확률적 접근을 이용한 이종 재료의 초음파 특성을 연구하였다. 그러나 접착이음 계면균열에서 발생하는 초음파 산란에 따른 영향에 대해서는 제시하지 못하였다. 초음파를 이종 접합부재에 적용할 경우, 접착계면에 의한 영향과 탐상 주파수에 따른 영향, 접착체의 밀도와 초음파 속도 즉, 음향임피던스 차이에 따라 초음파 산란으로 인한 음압의 감소가 현격하여 측정 정밀도에 큰 영향을 미친다. 이러한 초음파 산란에 대한 보정은 초음파 탐상시 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 이종 접합재 시험편은 알루미늄(Al)과 에폭시 수지(Epoxy resin)를 몰딩 접합(Al/Epoxy)시킨 DCB (double-cantilever beam) 시험편을 고안·제작하였다. 접촉매질, 모재와 접합층

<sup>†</sup> 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

E-mail : sungilndt@hotmail.com

TEL : (02)814-4758 FAX : (02)825-6263

\* 회원, 숭실대학교 기계공학과

\*\* 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

으로 조합된 3개층에서의 음압투과율 식을 유도하여 계면균열에서 초음파 산란에 영향을 미치는 인자를 도출하고 음압투과율에 따른 최적의 탐상 주파수를 설정하였다. 또한, 유도되어진 음압투과율 식과 접합체의 두께변화에 따라 계면균열에서 발생하는 초음파 산란·보정을 비교 검토한 후, 음압감소에 따른 최적의 초음파 산란 보정과 감쇠계수에 의한 계면균열 측정 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편의 형상 및 치수

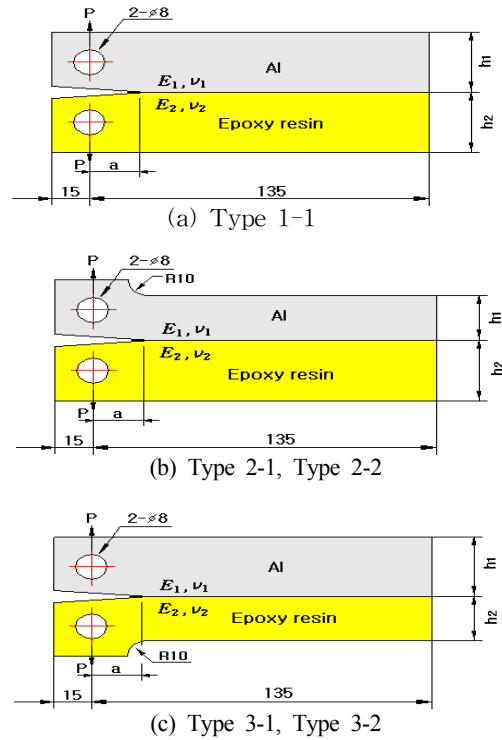
초음파 산란 보정에 의한 계면균열길이를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 시험편을 제작하였다. 모재는 균질재로 알루미늄 합금과 에폭시 수지를 사용하였고, 예비균열 길이  $a=10$  mm, 전체 길이  $L=135$  mm로 하였다. 재료의 물성치 및 초음파 특성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

### 2.2 시험편의 제작

알루미늄 판재를 소정의 치수로 밀링가공하고, 접합부위를 샌드페이퍼 #220으로 연마한 후, 아세톤으로 세척하였고, 에폭시 수지는 노내의 온도가  $158^{\circ}\text{C}$ 의 상태에서 아랄다이트(Araldite : Ciba사)의 주제를 용해하고, 주제와 경화제를 10:3의 중량비로 혼합하여 몰딩 접합에 의하여 제작하였다. 시험편의 몰딩 접합은 전기로 내에서 유리판 위에 셀로판지를 덮고 실리콘으로 둘레를 실링한 후, 준비된 알루미늄 시험편을 올려 놓고 에폭시 수지로 몰딩 접합하였다. 이때, 전기로 내에서  $158^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 24시간 경화시키고 12시간 서냉시켜 경화하였다. 예비균열의 형상은  $a=10$  mm 테플론 필름을 삽입하여 몰딩 성형하였다.

### 2.3 실험방법

만능재료시험기(Hounsfield H10KT)를 사용하여 편 하중을 작용시키고, 변위제어 방식으로 하중속도는  $0.5$  mm/min으로 하였다. 하중-하중점 변위선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였고, 하중점의 변위는 클립 게이지를 사용하여 측정하였다. 각 시험편마다 실험에서 기록된 하중-하중점 변위 선도로부터 균열길이에 대한 초음파 산란에 따른 보정값을 구하였고, 이를 적용하여 초음



Specimen	Size	Height		Adhesive layer, h	Width B
		$h_1$	$h_2$		
Dissimilar materials	Type 1-1	29	29	0	15
	Type 2-1	15	29		
	Type 2-2	20	29		
	Type 3-1	29	15		
	Type 3-2	29	20		

Fig. 1 Shape and dimension of DCB specimen

Table 1 Material properties of DCB specimen

Material properties	Density $\rho$ ( $10^3\text{kg/m}^3$ )	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio $\nu$
Specimen materials			
Aluminum	2.70	65.56	0.32
Epoxy resin	1.30	3.165	0.37

Table 2 Ultrasonic properties of DCB specimen

Material properties	Velocity, (m/s) $C_L$	Impedance, Z ( $10^6\text{kg/m}^2\text{s}$ )
Specimen materials		
Aluminum	6,260	16.90
Epoxy resin	2,800	3.70
Couplant	Glycerin	1,880
		2.40

과 감쇠계수를 측정하였다. 초음파 탐상기 (Sitescan 240)와 탐촉자는 진동자 직경 10 mm 인 수직탐촉자를 사용하였고, 접착매질은 글리세린을 사용하였다. 탐촉자 이동은 측정오차가 1/1000 mm까지 가능한 probe transfer system을 적용하였다. 이때 수직탐상에 의해 발생하는 접합체 및 계면균열에서 발생하는 초음파 산란은 초기 음압 즉, 대비시험편에서의 음압과 탐상에서 발생하는 음압의 차를 계산하고, 각각의 계면균열에서 발생하는 초음파 산란 보정을 비교하였다.

### 3. 접합부재에 대한 음압투과율

#### 3.1 접착매질층의 영향을 고려하지 않은 2개 층인 경우

초음파가 접합부재에 수직으로 투과하는 문제는 각 매질의 밀도와 초음파 속도에 의한 음향 임피던스를 고려하여야 한다. 또한, 접착매질층에서 발생하는 초음파 산란에 의한 감쇠는 측정 정밀도에 큰 영향을 미친다.

Fig. 2는 초음파가 시험편에 수직 입사 할 때의 형상을 나타낸 것이다. 음향임피던스  $Z_1$ 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, 다음 식과 같이 표시된다.

$$A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} + B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)} = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad (1)$$

$$A_1 + B_1 = A_2 \quad (at \ x=0) \quad (2)$$

식(1)을  $T(\partial y/\partial x)$ 로 편미분하고,  $T(k/w) = T/c = \rho c = Z$ 의 관계를 고려하여 정리하면, 다음 식과 같이 된다.

$$Z_1(A_1 - B_1) = Z_2 A_2 \quad (3)$$

식(2)를 식(3)에 대입하여 정리하면 접착매질층의 영향을 고려하지 않은 2개층에서의 음압투과율 식이 된다.

$$t = \frac{A_2}{A_1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

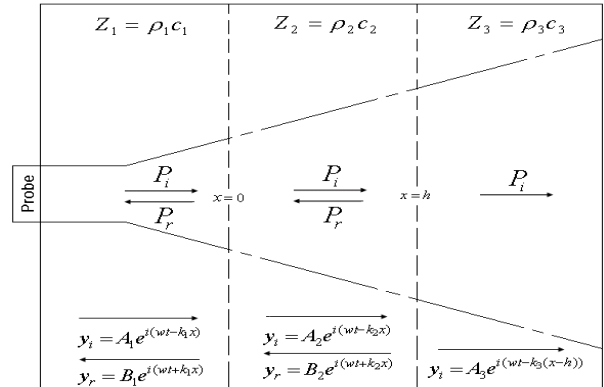


Fig. 2 Diagram of incident and reflected ultrasonic waves on adhesive interfaces

#### 3.2 접착매질층의 영향을 고려한 3개 층인 경우

접합부재에 대한 초음파 탐상시 모재와 접합층 및 접착매질층까지를 고려한다면, 조합되는 재료의 층은 수가 3개층이 되고, 음향임피던스는 각각  $Z_1, Z_2, Z_3$ 의 3개로 되므로 음압투과율의 식은  $Z_1, Z_2$ 에서 경계층이  $x=0$  인 경우 식(1)에 유도 과정을 적용하여 유도하면, 다음 식과 같다.

$$A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} + B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)} = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)} + B_2 e^{i(\omega t + k_2 x)} \quad (5)$$

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (at \ x=0) \quad (6)$$

식(5)를  $w$ 로 나누고,  $T(\partial y/\partial x)$ 로 편미분하여,  $T(k/w) = T/c = \rho c = Z$ 의 관계를 고려하여 정리하면, 다음 식과 같이 된다.

$$Z_1(A_1 - B_1) = Z_2(A_2 - B_2) \quad (7)$$

또한,  $Z_2, Z_3$ 에서 경계층  $x=h$ 를 식(5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$A_2 e^{-ik_2 h} + B_2 e^{ik_2 h} = A_3 \quad (8)$$

$$Z_2(A_2 e^{-ik_2 h} - B_2 e^{ik_2 h}) = Z_3 A_3 \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{A_2(Z_1/Z_2 + 1) + B_2(Z_1/Z_2 - 1)}{2Z_1/Z_2} \quad (10)$$

식(8)과 식(9)를  $A_2, B_2$  에 대해 정리하여 식(10)에 대입하고 오일러 공식에 의해 정리하면, 접촉매질층을 고려한 3개층에서의 음압투과율 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$t = \frac{A_3}{A_1} = \frac{2Z_1/Z_3}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right)\cos k_2h + i\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)\sin k_2h} \quad (11)$$

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

### 3.3 초음파 감쇠계수

초음파가 매질에 입사할 때 감쇠에 의한 음압의 변화는 지수 함수에 의해 감소한다. 실제 측정에서 초음파가 입사할 때 접촉매질에 의해 탐촉자와 시험편 사이에 일정 두께의 박막이 형성되므로, 이러한 접촉매질에 의한 감쇠와 모재의 접합층 두께 변화에 따라 발생하는 감쇠를 모두 고려한 감쇠계수( $\alpha$ )는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(3)</sup>

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

여기서,  $r_c$ 는 접촉매질에서의 음압반사율,  $r_m$ 는 모재에서의 음압반사율,  $x^* = P_n/(P_{n+1} - P_{n+2})$ ,  $y^* = (P_{n+1} - P_{n+2})/(P_{n+2} - P_{n+3})$ ,  $P_n$ 은 거리  $n$ 만큼 전반사 하였을 때의 음압을 나타내고  $l$ 은 시험편의 높이이다.

식(12)는 선형 초음파의 관점에서 해석한 것으로 접합부재의 초음파 감쇠계수를 결정하는데 사용되며, 본 실험에서는 식(12)를 적용하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 주파수와 음향임피던스의 관계

Fig. 3은 식(11)에 의해 계산되어진 음압투과율 값과 푸리에 변환에 의한 주파수 응답 결과를 음향임피던스 비의 변화에 따라 주파수 설정값을 도식한 것이다. 동종 접착 및 이종 접합부재는 산란에 대해 주파수 인자가 음압투과율에 크게 영향을 미치기 때문에 동종 접착부재( $Z_i/Z_j = 1$ )의

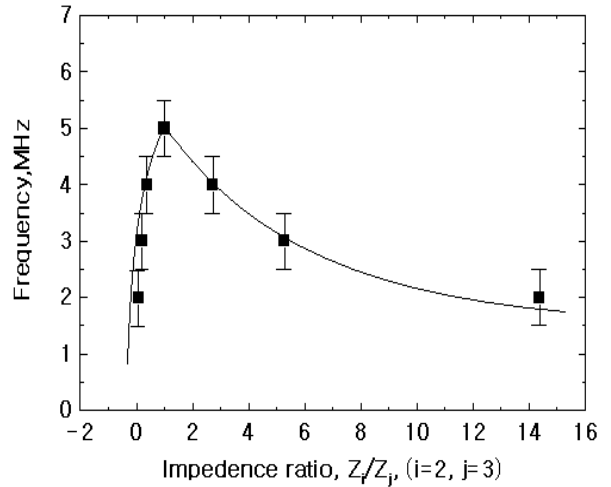


Fig. 3 Establishment of frequency by variation of impedance ratio

경우에는 낮은 주파수 보다는 산란이 적은 4~6MHz, 이종접합부재( $Z_i/Z_j < 1, Z_i/Z_j > 1$ )는 음향 임피던스의 차로 인해 높은 주파수 범위에서는 산란이 크기 때문에 낮은 주파수영역인 2~4MHz가 초음파 탐상에 최적의 조건으로 설정이 가능하다.

### 4.2 음압투과율과 음향임피던스의 관계

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

Fig. 4는 재료 조합의 수가 2개, 3개층인 경우 유도되어진 음압투과율의 식을 검증하기 위하여 Type 1-1 시험편의 접합체 고유의 음향임피던스 비와 이론 음압투과율의 관계를 이론 및 실험값과 비교하여 나타낸 것이다. 접촉매질층의 영향을 고려하지 않은 경우는 이종 접합부재인 알루미늄과 에폭시 시험편은 매질의 서로 다른 음향임피던스로 조합되어져 있어 이 값의 영향으로 이론값과 차이를 나타낸다. 또한, 접촉매질층을 고려한 3개층의 경우에는 접촉매질층에서의 음향임피던스 차이로 발생하는 초음파 산란에 의해 음압투과율 값이 전체적으로 감소한다. 이는 접촉매질층과 접합계면에서 발생하는 초음파 산란은 음향임피던스 비의 영향을 받는 것을 의미한다.

### 4.3 접합체 두께 비와 초음파 감쇠계수의 관계

Fig. 5는 계면균열이 없는 경우 접합체의 비의 변화에 따른 초음파 감쇠계수와와의 관계를 나타낸

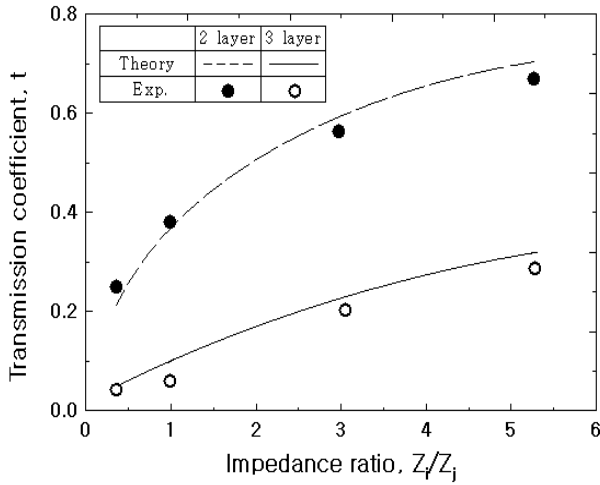


Fig. 4 Relationship between transmission coefficient and impedance ratio (Type 1-1)

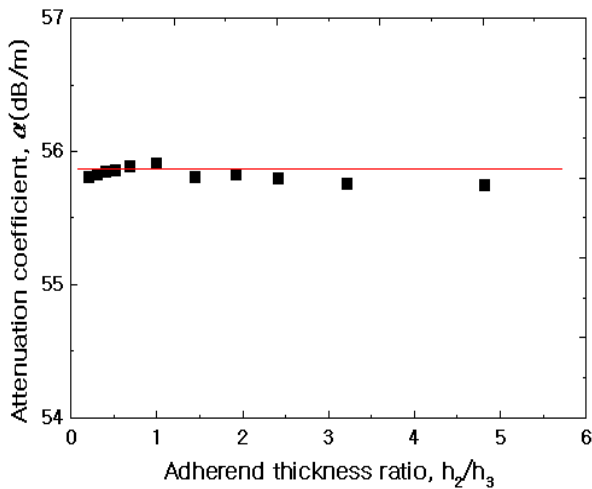


Fig. 5 Relationship between attenuation coefficient and adherend thickness ratio ( $a=0$ )

것이다. 접합체의 비가 증가할수록 접합계면에서의 초음파 감쇠계수가 변화를 보이는 것은 몰딩 접합시에 모재에서 발생된 미세한 기포의 영향으로 초음파 탐상시 정밀도에는 큰 영향을 미치지 않는다. 또한, Fig. 6은 각각의 시험편의 접합체의 비에 따른 초음파 감쇠계수의 관계를 각각의 균열길이에 대해 나타낸 것이다. 균열길이의 변화에 따라 접합체의 비가  $h_1/h_2=1$ 인 경우를 중심으로 서로 좌우 대칭을 나타낸다.

4.4 접합체 두께 비와 초음파 보정

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 6에서 발생된 접합체의 비의 변화에 따라 발생하는 초음파 감쇠계수를 토대로 초음파 보정값을 계산하여 도시한 것이다.

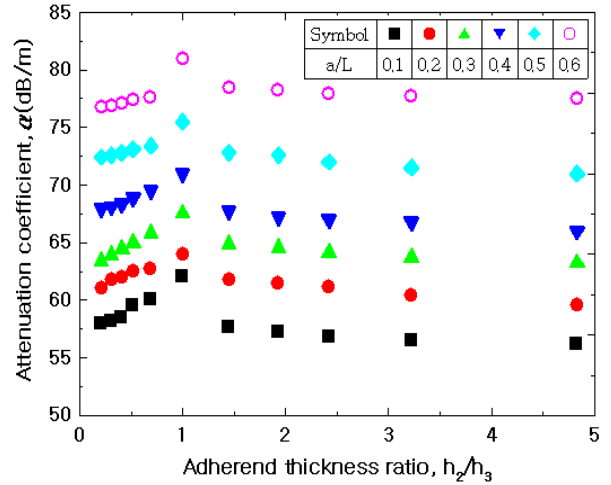


Fig. 6 Relationship between attenuation coefficient and adherend thickness ratio

접합체의 비( $h_1/h_2=1$ )를 기준으로 좌우로 보정량의 증가와 감소를 나타낸다. 따라서, 접합체의 두께비에 따른 보정량의 관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Calibration value, dB} \\ & = -3.897(h_1/h_2)^2 + 7.054(h_1/h_2) + 2.809 \\ & \quad (\text{at } h_1/h_2 \leq 1) \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} & \text{Calibration value, dB} \\ & = 0.176(h_1/h_2)^2 - 1.846(h_1/h_2) + 7.441 \\ & \quad (\text{at } h_1/h_2 \geq 1) \end{aligned}$$

식(13)을 적용하여 이중 접합부재에서의 계면균열길이를 측정하였다.

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 계면균열길이 따른 초음파 보정값을 적용하여 초음파 감쇠계수에 의한 측정결과를 나타낸다. Type 1-1을 기준으로 Type 2-1과 Type 2-2는 모재의 두께의 비가 감소할수록 같은 균열길이에서는 초음파 감쇠계수는 증가하고, Type 3-1과 Type 3-2에서는 상대적으로 감소한다.

초음파 산란 보정에 의한 초음파 감쇠계수와 균열길이와의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{a}{L} = -0.0005 a^2 + 0.1043 a - 4.1884 \quad (\text{Type 1-1}) \tag{14}$$

$$\frac{a}{L} = -0.0005 a^2 + 0.0954 a - 3.8529 \quad (\text{Type 2-1, 2-2})$$

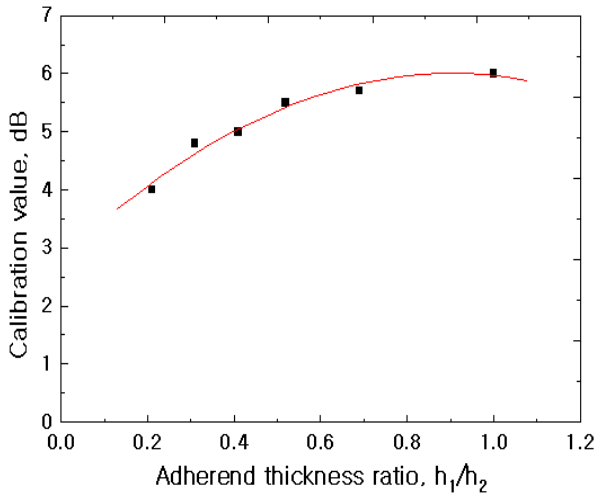


Fig. 7 Relationship calibration value and adherend thickness ratio ( $h_1/h_2 < 1$ )

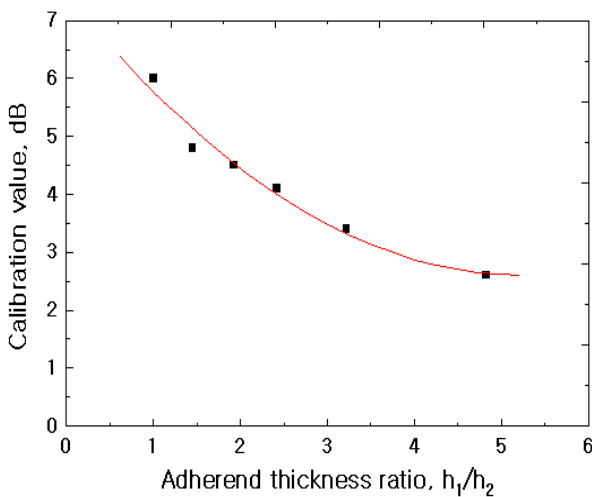


Fig. 8 Relationship calibration value and adherend thickness ratio ( $h_1/h_2 > 1$ )

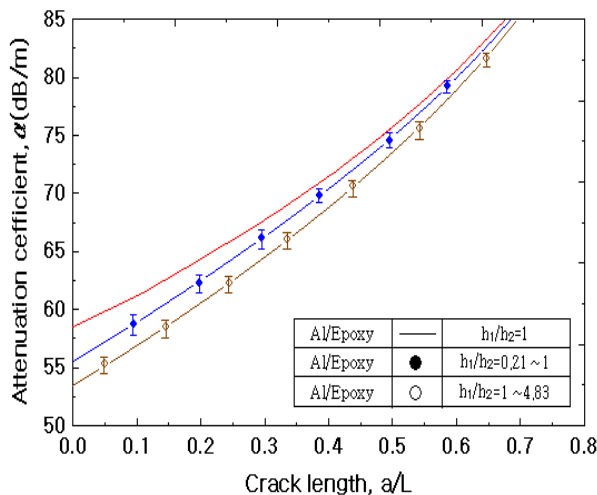


Fig. 9 Relationship Attenuation coefficient and crack length

$$\frac{a}{L} = -0.0005 a^2 + 0.0947 a - 3.7179 \quad (\text{Type } 3-1,3-2)$$

따라서, 접합부재의 초음파 감쇠계수를 구하면 식(13), 식(14)를 이용하여 계면균열길이를 측정할 수 있다.

### 5. 결론

이중 접합부재에 대한 음압투과율의 식을 유도하고 접합부재 계면균열에 대한 초음파 탐상 특성을 검토한 후, 접합체의 두께변화에 따른 초음파 산란·보정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 접합부재의 계면에 대한 초음파 탐상 특성에 영향을 미치는 인자로는 음향임피던스, 접합체의 물성치, 주파수 등이 있고, 이를 토대로 음향임피던스 비의 변화에 따른 음압투과율 및 주파수의 상호관계를 검토하였다.

(2) 접합부재의 조합에 따른 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) 접합체의 두께비를 측정하면 보정량을 계산할 수 있고, 이를 적용하여 초음파 감쇠계수에 의해 계면균열 길이를 측정할 수 있다.

(4) 접합체 두께변화에서 발생하는 초음파 산란에 대해 계산된 보정량을 초음파 탐상에 적용하게 되면 분해능 및 정밀도가 향상됨을 알 수 있다. 또한, 보정전과 보정후의 측정결과를 비교하면 4~5% 이내의 측정 정밀도를 나타내었다.

### 참고문헌

- (1) R. A. Kline, C. P. Hsiao, 1986, "Nondestructive Evaluation of Adhesively Bonded Joint," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 18, pp. 214~217
- (2) Z. Derouiche., C. Dlebarre., 1995, "Ultrasonic Characterization of Heterogeneous Materials Using a Stochastic Approach," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 4, pp. 2304~2315.
- (3) Ping. H., 2001, "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using both Transmitted and Reflected Pulses," *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 27~32.