Al/Epoxy 이종재 접합 계면의 초음파 감쇠계수에 의한 균열길이의 측정

박성일† · 정남용*

Measurement of Crack Length by Ultrasonic Attenuation Coefficients on Interfaces of Al/Epoxy Bonded Dissimilar Materials

Sung Il Park, Nam Yong Chung

Key Words: Acoustic Impedance(음향 임피던스), Attenuation Coefficient(감쇠계수), Compliance(컴플라이언스), Double-Cantilever Beam(이중 외팔보), Energy Release Rate(에너지 방출률), Interfacial Crack(계면균열), Transmission Coefficient(통과율), Ultrasonic Test(초음파 탐상)

Abstract

The initial crack often occurs on the bonded interface and it is the general cause of the interface fracture. It is very significant to establish the measurement method of interfacial crack by applying the ultrasonic technology into the interface of bonded dissimilar materials. In this paper, the interfacial crack length was measured by ultrasonic attenuation coefficient in the Al/Epoxy bonded dissimilar materials of double-cantilever beam(DCB). The energy release rate, G, was obtained by the experimental and Ripling's equation measurement of compliance. The experimental results represent that the relation between interfacial crack length for the ultrasonic attenuation coefficient and energy release rate is increased proportionally. From the experimental results, a measurement method of the interfacial crack length by the ultrasonic attenuation coefficient was proposed and discussed.

1. 서 론

신소재 개발과 비용절성 고분자 재료의 개발에 따른 동종 및 이종접착재는 일반적으로 종래의 금속재료와 비교해 제품의 경량화, 고기능화, 설계의 합리화 및 부식방지 등의 우수한 성질로 인하여 각종 산업분야에서 그 활용범위가 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나, 접착부재의 접착계면은 결정구조, 균열의 상태, 기공의 크기 및 형상 등의 여러 인자들에 의해 재료의 강도 및 신뢰성에 영향을 받는다. 또한, 계면균열의 발생·성장은 결국 접착부재를 파단에 이르게 하여 예기치 않은 사고로 인한 인명피해 및 경제적 손실을 초래하므로 피해를 사전에 방지하기 위해서는 접착부재에 대한 계면균열을 조기에 검출하는 것이 무엇보다 중요하다.[1~2] 그러나 용접재 및 균질재에 대한 비파괴 검사의 적용은 많은 발전을 거듭해 왔지만 접착부재의 계면균열 검출에 대한 연구는 미진하고 비파괴검사 방법 및 평가방법도 미확립된 상태이다. 그러므로 접착부재에 대한 계면균열의 검출방법을 제시하는 것은 접착부재의 안전성 및 신뢰성을 확보하는데 있어 중요한 역할을 한다.

비파괴검사 방법중 초음파 탐상법을 접착부재의 계면균열 검출에 적용할 경우 탐상 주파수, 밀도 및 초음파 속도에 의한 음향 임피던스의 차는 초음파 탐상에서 중요한 인자로 작용하고, 균열선단의 변위 및 균열길이는 초음파 산란에 큰

† 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과
E-mail : sungilndt@hotmail.com
TEL : (02)814-4758 FAX : (02)825-6263
* 회원, 숭실대학교 기계공학과

영향을 미쳐 이로 인해 음압의 현격한 감소로 초음파 감쇠계수의 변화가 발생한다.

지금까지 발표되고 있는 여러 연구 결과를 살펴보면, Derouiche[3]는 확률적 접근을 통해 이종재료의 초음파 에코 특성을 연구하였고, Ping[4]은 음향반사와 통과 펄스를 이용하여 재료에 대한 산란과 감쇠를 측정하였다. 그러나, 계면균열에 대한 초음파 감쇠계수와 균열이 진전하면서 발생하는 에너지 방출률의 상호관계를 연구한 결과는 보고 되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 이종 접합재에서 계면균열이 발생하기 위해서는 균열 진전에 따라 에너지가 방출되고, 이때 균열에 대해 초음파 탐상을 적용하면 균열 진전에 따른 초음파 감쇠가 발생하는 것에 착안하여 이종 접합재에 대한 계면균열 길이를 초음파 감쇠계수를 이용하여 측정하는 방법의 제시를 목적으로 한다.

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 접착층($h_1 = 0$)으로 조합된 3개층에서의 음압통과율 식을 이용하여 초음파 감쇠에 영향을 미치는 인자를 도출하였다. 계면균열의 길이 변화에 따른 컴플라이언스(compliance)와 Ripling의 식에 의한 결과를 비교하고, 이를 토대로 에너지 방출률을 구하였다. 또한, 균열길이의 변화에 따른 초음파 에코의 비, 에너지 방출률 및 초음파 감쇠계수의 상호 관계를 비교·검토하고, 초음파 감쇠계수에 의한 계면균열 길이의 측정 방법을 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1 시험편의 형상 및 치수

초음파 감쇠계수에 의한 균열길이를 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℃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℃의 온도로 24시간 경화시키고 12시간 서냉시켜 경화하였다. 예비균열의 형상은 0.2 mm 두께의 테플론 필름을 삽입하여 몰딩 성형하였다.

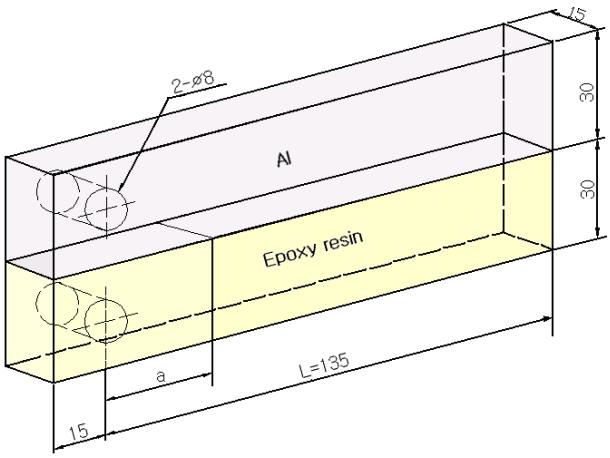

Fig. 1 Shape and dimension of DCB specimen

Table 1 Material properties of DCB specimen

Material properties / Specimen materials	Density ρ (10^3kg/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 (10^6kg/m^{2}s)
Aluminum		6,260	16.90
Epoxy resin		2,800	3.70
Couplant	Glycerin	1,880	2.40

2.3 실험방법

만능재료시험기(Hounsfield H10KT)를 사용하

여 핀 하중을 작용시키고, 변위제어 방식으로 하중속도는 0.05 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 컴플라이언스를 구하였고, 이를 에너지로 환산하기 위해 하중에 따른 균열길이를 구하여 에너지 방출률을 계산하였다. 이때, 균열길이 변화에 따른 초음파 감쇠계수를 측정하였다. 초음파 탐상기(Sitescan 240)와 탐촉자는 진동자 직경 10 mm, 주파수 4MHz의 수직 탐촉자를 사용하였다. 계면균열 길이에 따른 음압 차는 대비 시험편에서의 음압과 초음파 탐상에서 발생되는 제1회 반사에코와 제2회 반사에코의 비로 계산하였다.

3. 에너지 방출률과 초음파 감쇠계수

3.1 컴플라이언스와 에너지 방출률

에너지 방출률은 컴플라이언스를 실험에서 직접 측정하여 구할 수 있다. 두께 B, 균열길이 a 인 탄성체에 정적하중 P가 작용하여 균열이 da 만큼 진전하였을 때 하중-하중점 변위 δ 선도에서 컴플라이언스 C는 δ/P 로 나타낸다. 또한, 에너지 방출률 G와 컴플라이언스 C의 관계는 다음 식으로 표시된다.

$$G=\frac{P^2}{2B}\frac{dC}{da} \tag{1}$$

여기서, U는 균열진전에 의해 소비되는 탄성변형에너지를 의미하고, A는 균열의 진전 면적을 나타낸다.

3.2 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 막이 형성되므로, 이러한 접촉매질에 의한 감쇠와 모재의 접착층에서 발생하는 감쇠를 모두 고려한 초음파 감쇠계수(α)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

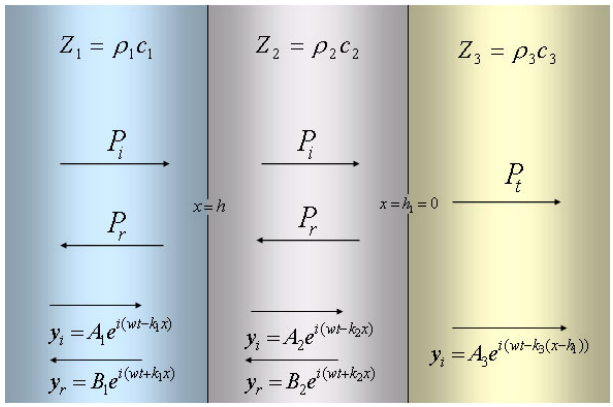

Fig. 2 Diagram of incident and reflected ultrasonic waves on adhesive interfaces

$$\alpha=20\frac{1}{4H}\log\left[\ r_c{}^2\ r_m{}^2\cdot\left|\frac{F_n}{F_{n+1}-F_{n+2}}-\frac{F_{n+1}-F_{n+2}}{F_{n+2}-F_{n+3}}\right|\right] \tag{2}$$

여기서, r_c는 접촉매질에서의 음압반사율, r_m는 모재에서의 음압반사율을 나타내고, F_0 는 초기 음압, F_n 은 거리 n 만큼 전반사 하였을 때의 음압을 나타내고, H는 시험편의 높이이다.

식(2)는 선형 초음파의 관점에서 해석한 것으로 균질재의 초음파 감쇠계수를 결정하는데 사용되며, 본 실험에서는 식(2)를 적용하였다.

3.3 초음파 음압반사율과 통과율

Fig. 2는 초음파가 매질에 수직 입사할 때 반사 및 통과를 나타낸 것으로 서로 다른 매질로 초음파가 입사할 때 발생하는 음압반사율과 통과율은 매질의 음향 임피던스에 따른 영향을 고려하여야 한다. 따라서, 음파가 서로 다른 음향 임피던스의 매질로 입사할 때 발생하는 음압반사율은 다음 식과 같이 된다.

$$r_c=\frac{(Z_1/Z_2-Z_2/Z_1)}{\sqrt{4cot^2kh+(Z_1/Z_2+Z_2/Z_1)^2}}$$
$$r_m=\frac{(Z_2/Z_3-Z_3/Z_2)}{\sqrt{4cot^2kh_1+(Z_2/Z_3+Z_3/Z_2)^2}} \tag{3}$$

여기서, $k=2\pi/\lambda$, $\lambda=C/f$, λ는 파장, C는 매

질의 속도, h와 h_1은 각각 접촉매질층 및 접착층의 두께, f는 주파수, Z_i는 각 재질의 음향 임피던스를 나타낸다.

또한, 접촉매질층, 모재와 접착층 두께($h_1 = 0$)를 고려하였을 때, 음압통과율(t)은 다음 식과 같이 유도된다.

$$t = \frac{2}{(Z_1/Z_3 + 1)coskh_1 + i(Z_1/Z_2 + Z_2/Z_3)sinkh_1} \tag{4}$$

3.4 Ripling의 식

실험에 의한 컴플라이언스의 계산결과의 정밀도를 검증하기 위하여 Ripling의 식과 비교하였다. Ripling의 식은 접착층이 없는 균질재의 DCB 시험편에 대한 컴플라이언스의 근사식이지만, DCB 접착이음에 대한 컴플라이언스의 계산에도 널리 사용되고 있는 식으로 다음과 같이 표시된다.[5]

$$C = \frac{1}{3E_1I_1}[(a + a_0)^3 + H_1^2 a] + \frac{1}{3E_2I_2}[(a + a_0)^3 + H_2^2 a] \tag{5}$$

여기서, E_i는 접착체의 세로탄성계수, I_i는 단면 2차 모멘트, H_i는 접착체의 높이, $H^2_i\ a$는 전단에 의한 수정량, a는 균열길이이다. a_0는 시험편의 회전 보정량으로 Ripling은 $a_0 = 0.6\,H_i$로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Al/Epoxy 이종 접합재의 컴플라이언스

Fig. 3은 Al/Ced.1500/Al 동종 접착부재와 Al/Epoxy 이종 접합재에 대해 실험에서 측정한 하중과 하중점의 변위를 사용하여 컴플라이언스를 구한 후, 계면균열 길이의 변화에 대한 컴플라이언스와 Ripling의 식을 비교하여 나타내었다.

동종 접착부재와 이종 접합재를 비교하여 보면 접착층의 두께와 접착 강도의 차이로 인해 이종 접합재의 컴플라이언스가 작게 나타난다. 또한, 실험에서 구한 값이 미소한 값으로 편차를 보이는 것은 모재 두께의 영향, 재료 물성치, 접착계면 특이성 등의 영향으로 볼 수 있다.

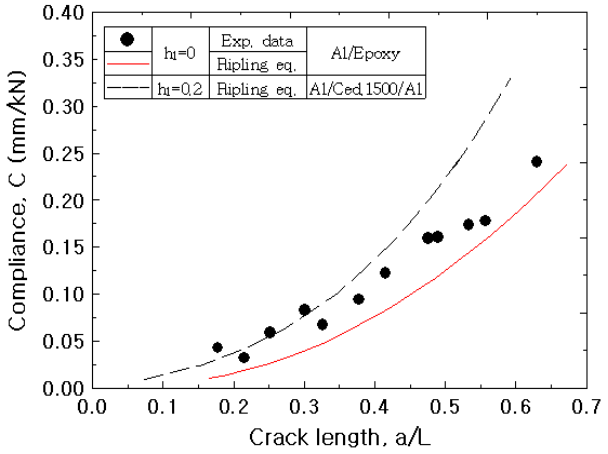

Fig. 3 Relation between compliance and interfacial crack length

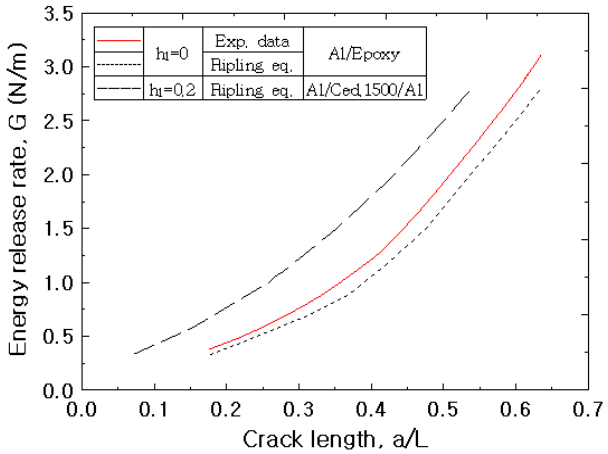

Fig. 4 Relation between energy release rate and interfacial crack length

4.2 Al/Epoxy 이종 접합재의 에너지 방출률

동종 접착부재와 이종 접합재에 대한 실험값 및 이론식에 의한 컴플라이언스를 에너지로 환산하기 위해 균열길이에 대하여 최소 자승법을 이용하여 2차 근사식을 구한 후, 이를 미분하여 식 (1)에 적용하여 구하였다.

Fig. 4는 동종 접착부재와 이종 접합재에 대한 실험값과 Ripling의 식에 의한 에너지 방출률을 계산하여 비교・도시하였다. 접착층이 있는 동종 접착부재와 접착층이 없는 이종 접합재에 대한 에너지 방출률을 비교하여 보면, 접착계면의 균열선단에 작용하는 응력집중 현상의 차이로 인해 이종 접합재에서 발생하는 에너지 방출률은 작게 나타난다. 이종 접합재에서 실험에 의한 에너지 방출률이 균열길이가 증가할수록 Ripling의 식과 차이가 커지는 것은 균열길이가 길어지면 균

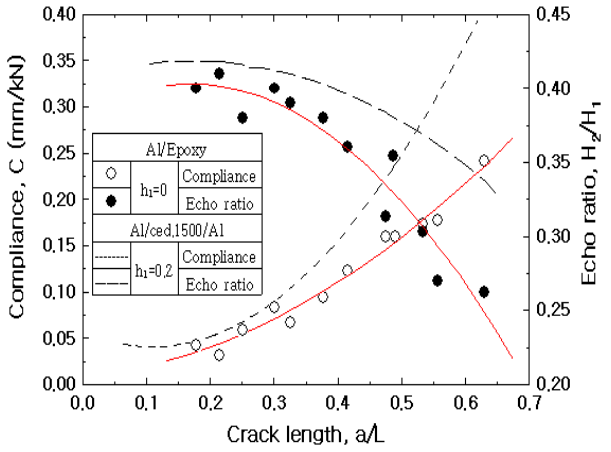

Fig. 5 Relation between compliance and echo ratio versus interfacial crack length

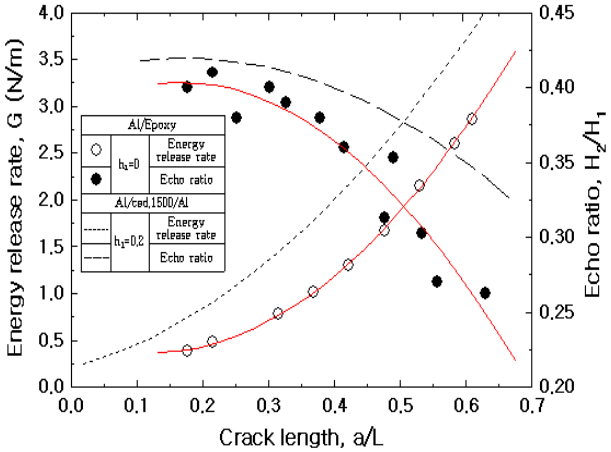

Fig. 6 Relation between energy release rate and echo ratio versus interfacial crack length

열선단에서 하중점의 회전량이 커지기 때문이다.

4.3 계면균열 길이와 초음파 에코의 비

Fig. 5는 실험에 의한 컴플라이언스 및 초음파 에코의 비와 계면균열 길이를 무차원하여 나타내었다. 균열길이가 증가할수록 컴플라이언스도 증가하지만, 초음파 에코의 비는 감소한다. 또한, 균열이 진전할 때 발생하는 에너지 방출률은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 균열이 진전할수록 에너지 방출률도 증가하고, 초음파 에코의 비는 감소한다. 따라서, 균열길이에 따른 컴플라이언스와 에너지 방출률은 초음파 에코의 비와 반비례 관계를 나타낸다.

Fig. 7은 계면균열 길이에 따른 초음파 감쇠계수와 에코 비의 관계를 나타내고 있다. 초음파 감쇠계수가 증가할수록 초음파 에코의 비는 상대적으로 감소하는 반비례 관계를 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에서의 결과를 토대로 동종 접착

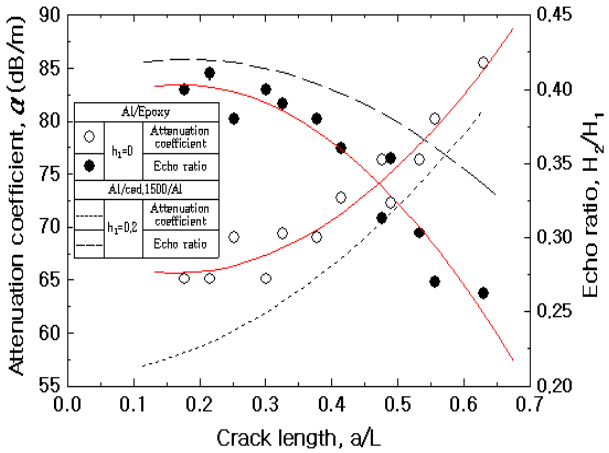

Fig. 7 Relation between attenuation coefficient and echo ratio versus interfacial crack length

부재와 이종 접합재를 비교하여 보면, 이종 접합재에서의 컴플라이언스와 에너지 방출률 및 에코의 비가 동종 접착부재에 비해 전체적으로 감소한다. 또한, Fig. 7에서 초음파 감쇠계수는 동종 접착부재보다 이종 접합재에서 음향 임피던스의 차에 의한 산란으로 인해 증가하지만, 에코의 비는 감소한다.

4.4 계면균열 길이와 초음파 감쇠계수

Fig. 8은 균질재인 알루미늄과 동종 접착부재 및 이종 접합재에 대한 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 균질재인 알루미늄은 초음파 감쇠계수가 증가할수록 에너지 방출률은 곡선적으로 증가하는 반면 동종 접착부재 및 이종 접합재는 직선적으로 증가한다. 또한, 접착층이 있는 동종 접착부재보다 접착층이 없는 이종 접합재에서 초음파 감쇠계수가 더 크게 나타난다.

Al/Epoxy 이종 접합재에 대한 실험과 Ripling의 식에 의해 구하여진 에너지 방출률(G)과 초음파 감쇠계수(α)의 관계를 식으로 유도하면 다음 식과 같다.

$$G = 0.1088\alpha - 6.4431 \qquad (6)$$

Fig. 9는 계면균열 길이에 대한 초음파 감쇠계수의 관계를 도시한 것이다. 균질재에 비해 동종 접착부재 및 이종 접합재에서는 접착계면의 특이성 및 재료의 음향 임피던스의 차로 인한 산란으로 초음파 감쇠계수가 증가하였다. 또한, 균열길이가 증가할수록 초음파 감쇠계수는 곡선적으로

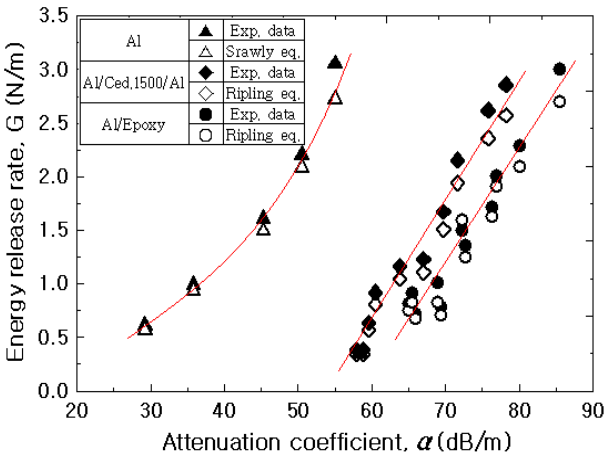

Fig. 8 Relation between attenuation coefficient and energy release rate

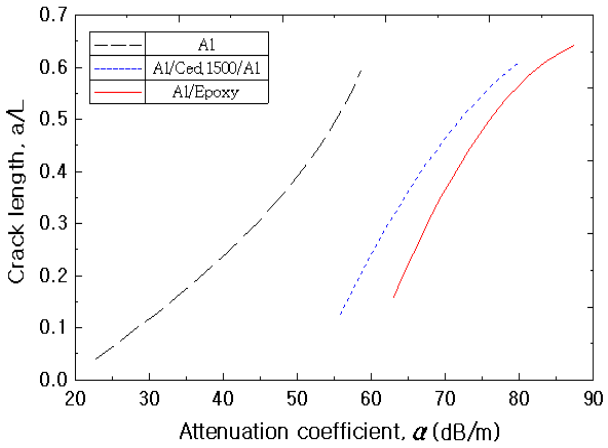

Fig. 9 Relation between attenuation coefficient and interfacial crack length

증가를 나타내었다. 초음파 감쇠계수가 증가한다는 것은 초음파 에코 비가 상대적으로 감소함을 의미한다.

Al/Epoxy 이종 접합재에 대한 계면균열 길이와 에너지 방출률, 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 이용하여 균열길이와 초음파 감쇠계수의 관계를 유도하면 다음 식과 같이 된다.

$$\alpha = 87.5950\left(\frac{a}{L}\right)^2 - 28.1498\left(\frac{a}{L}\right) + 67.8999 \quad (7)$$

$$\frac{a}{L} = -5.6138\times10^{-4}\alpha^2 + 0.1043\alpha - 4.1884$$

따라서, 초음파 감쇠계수를 측정하면 식(6)과 식(7)를 이용하여 균열길이를 구할 수 있고, 에너지 방출률과 이들의 상호관계를 측정할 수 있다.

5. 결 론

Al/Epoxy 이종 접합재에 대한 초음파 감쇠계수와 컴플라이언스에 의한 에너지 방출률을 구한 후, 계면균열 길이와 감쇠계수 및 에너지 방출률의 관계를 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면균열 길이가 증가할수록 초음파 에코의 비는 상대적으로 감소하는 반비례 관계를 나타낸다.

(2) 균질재인 알루미늄은 초음파 감쇠계수가 증가할수록 에너지 방출률은 곡선적으로 증가하고, 동종 접착부재 및 이종 접합재는 직선적으로 증가하는 비례관계이다.

(3) 균질재에 비해 동종 접착부재 및 이종 접합재에서는 접착계면의 특이성 및 재료의 음향 임피던스의 차로 인한 산란으로 초음파 감쇠계수가 증가하고, 균열길이가 길어질수록 초음파 감쇠계수는 곡선적으로 증가를 나타내었다.

(4) 초음파 감쇠계수를 측정하면 계면균열 길이를 구할 수 있고, 에너지 방출률과 이들 상호관계를 측정할 수 있다.

참고문헌

(1) Chung. N. Y., Park. S. I., Lee. M. D., 2001, "Detection of Interface Crack Using Ultrasonic Method in Adhesively Bonded Joint," *Transaction of the KSME,* Vol. 25, No. 3, pp. 415~423.

(2) Biwa. S., Watanabe. Y., 2003, "Analysis of Wave Attenuation in Unidirectional Viscoelastic Composites by a Differential Scheme," *Composite Science and Technology,* Vol. 63, pp. 237~247.

(3) 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.

(4) Ping. H., 2001, "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using both Transmitted and Reflected Pulses," *Ultrasonics,* Vol. 39, pp. 27~32.

(5) Rippling's. E. J., Mostovoy. S., Patrick. R. L., 1964, "Measuring Fracture Toughness of Adhesive Joints," *Materials Research Standard,* Vol. 4, pp. 129~134.