

접착부재의 초음파 감쇠계수에 의한 계면균열 길이의 측정

정 남 용^{*1)} · 박 성 일²⁾

송실대학교 기계공학과¹⁾ · 송실대학교 대학원 기계공학과²⁾

Measurement of Interfacial Crack Length by Ultrasonic Attenuation Coefficients on 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 1 July 2003 / Accepted 22 October 2003)

Abstract : The ultrasonic attenuation coefficients were measured by interfacial crack length in the adhesive components of double-cantilever beam(DCB). The energy release rate, G, was obtained by the experimental measurement of compliance. The numerical analysis by the boundary element method(BEM) and Ripling's equation was investigated. The experimental results represent that the relation between interfacial crack length for the ultrasonic attenuation coefficient and energy release rate is increased proportionally. A measurement method of the interfacial crack length by the ultrasonic attenuation coefficient was proposed and discussed.

Key words : Adhesively bonded components(접착부재), Attenuation coefficient(감쇠계수), Boundary element method(경계요소법), Double-cantilever beam(이중 외팔보), Energy release rate(에너지 방출률), Ultrasonic test(초음파 탐상)

1. 서론

접착기술의 발전과 비용접성 고분자 재료의 개발에 따른 구조접착은 제품의 경량화, 고기능화, 고신뢰성, 설계의 합리화 및 부식방지 등의 목적으로 항공기를 비롯하여 자동차, 철도차량, 승강기, 우주기기, 반도체, 그리고 의료기기 등에 그 활용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 특히, 자동차 산업에서는 운동성능의 개선이나 안전성, 경제성 등의 향상을 목적으로 경량화가 진행되고 있으며 접착을 적용한 구조용 접합방법이 많은 관심을 모으고 있다. 경량화는 자동차에 적용되는 부품을 합리적으로 설계하

는 것 이외에도 경량재 즉, 접합방법을 적용한 접착부재를 사용하여 각종 부품의 중량을 저감할 수 있는 필요성이 한층 강조되고 있다. 그러나, 자동차에 적용되고 있는 접착부재의 접착계면은 미시적 구조가 매우 복잡하고, 현저한 응력집중으로 인한 응력특이성 때문에 계면균열이 발생하기 쉽다. 이러한 계면균열의 발생·성장은 결국 접착부재를 파단에 이르게 하여 예기치 않은 차량의 사고로 인한 인명피해 및 경제적 손실을 초래하므로 피해를 사전에 방지하기 위해서는 접착부재에 대한 계면균열을 조기에 검출하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러나 균질체에 대한 비파괴 검사의 적용은 많은 발전을 거듭해 왔지만,¹⁻¹⁴⁾ 접착부재의 계면균열 검출에 대한 연구는 미진하고 비파괴검사 방법 및 평가방법도

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

미확립된 상태이다. 그러므로 접착부재에 대한 계면균열의 검출방법을 제시하는 것은 접착부재의 안전성 및 신뢰성을 확보하는데 있어 중요한 역할을 한다. 비파괴검사 방법중 초음파 탐상법을 접착부재의 계면균열의 검출에 적용할 경우 탐상 주파수, 밀도 및 초음파 속도에 의한 음향 임피던스의 차가 고려되어야 한다. 계면균열이 진전함에 따라 초음파의 산란이 발생하고, 음압이 감소하여 초음파 감쇠계수의 변화가 생긴다.

관련된 연구 결과를 살펴보면, 수침법을 이용하여 재료의 결정입자 크기에 따른 감쇠의 측정과 재료의 변화에 의한 산란 및 감쇠의 측정 결과가 발표되고 있다. Kline¹⁵⁾은 초음파 분광 기술을 이용한 산란과 감쇠에 대하여 연구하였고, Ping¹⁶⁾은 음향 반사와 통과 펄스를 이용하여 재료에 대한 산란과 감쇠를 측정하였다. 그러나, 초음파 탐상을 이용한 접착부재의 계면균열의 검출에 대한 연구결과는 보고되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 접착부재에 계면균열이 발생하기 위해서는 에너지가 방출되고, 균열의 진전에 따른 초음파 감쇠가 발생하는 것에 착안하여 접착부재의 초음파 감쇠계수에 의한 계면균열 길이를 측정하는 방법의 제시를 목적으로 한다.

접착부재의 시험편은 접착제인 알루미늄(Al 5052)을 세메다인(Ced.) 1500으로 접착(Al/Ced./Al) 시킨 DCB(double-cantilever beam) 시험편을 고안·제작하였다. 접착매질, 모재와 접착층으로 조합된 4개층에서의 음압통과율 식을 이용하여 초음파 감쇠에 영향을 미치는 인자를 도출하였다. 계면균열의 길이 변화에 따른 컴플라이언스(compliance)와 Ripling의 식 및 경계요소법(boundary element method; BEM)에 의한 수치해석 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. 실험

2.1 시험편의 형상 및 치수

초음파 감쇠계수에 의한 계면균열의 길이를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 DCB 접착부재 시험편을 제작하였다. 예비균열 길이 $a=10\text{mm}$, 접착체의 길이 $L=135\text{mm}$, 접착층의 두께 $h_1=0.2\text{mm}$ 로 하였다. 또한, 접착체는 불투명체인 알루미늄이고, 접착제는 구조접착제로 널리 이용되고 있는 세메다인 1500을 사용하였다. 재료의 화학적 조성치와 물성치 및 초음파 특성은 각각 Table 1, Table 2와 Table 3에 나타내었다.

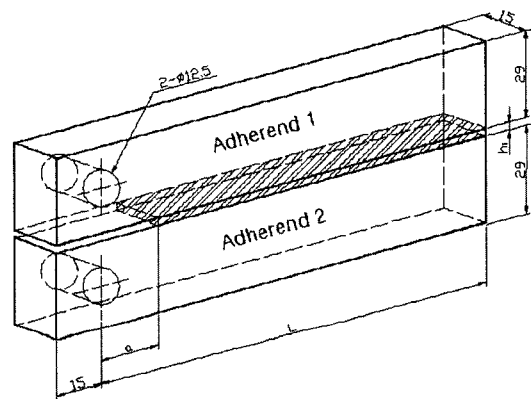


Fig. 1 Shape and dimension of DCB specimen in adhesively bonded components

Table 1 Chemical component of specimen materials

Aluminum 5052								
Component	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Mg	Cr
wt. %	96.2	0.25	0.40	0.10	0.10	0.10	2.60	0.25
Cemidine 1500								
Item	Main component		Viscosity		Gravity			
Adhesive	Epoxy resin		350		1.16			
Main ingredient	Epoxy resin		350		1.16			
Hardener	Polyamino resin		600		0.97			

Table 2 Material properties of DCB specimen

Specimen materials	Material properties	Density ρ (10^3 kg/m^3)	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio ν
Al 5052		2.70	65.56	0.32
Ced. 1500		1.07	2.06	0.40

Table 3 Ultrasonic properties of DCB specimen

Specimen materials		Material properties		Impedance Z (10 ⁶ kg/m ² s)
		Velocity, C(m/s)		
		Longitudinal wave, C _L	Shear wave, C _S	
Adherend	Al 5052	6,260	3,080	16.90
		3,080		
Adhesive	Ced. 1500	2,034	831	2.20
		831		
Couplant	Glycerin	1,880		2.40

2.2 시험편의 제작

접착체를 소정의 치수로 밀링가공하고, 접착면을 #220의 샌드 페이퍼로 연마한 후 아세톤으로 세척하고, 세메다인 1500의 접착제로 접착하였다. 접착제는 주체와 경화제의 혼합형인 세메다인 1500을 사용하였고, 주체와 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하였다. 접착제는 기포가 생기지 않도록 충분히 혼합시킨 후 인공 예비균열의 성형을 용이하게 하고, 접착층의 두께를 일정하게 유지시키기 위하여 0.2 mm 두께의 테프론 필름을 시험편 접착부위의 끝단에서 2mm 위치에 삽입하여 성형한 후, 절단하여 시험편을 제작하였다. 또한, 접착압력을 일정하게 유지하기 위하여 지그를 사용하였고, 접착한 시험편은 지그에 고정된 상태로 전기로 내에서 60°C로 2시간 동안 경화하였다.

2.3 실험방법

만능재료시험기(Hounsfield H10KT)를 사용하여 핀 하중을 작용시키고, 변위제어 방식으로 하중속도는 0.5mm/min으로 하였다. 하중-하중점 변위선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였고, 하중점의 변위는 클립 게이지를 사용하여 측정하였다. 각 시험편마다 실험에서 기록된 하중-하중점 변위 선도로부터 각 균열길이에 대한 컴플라이언스를 구하였고, 하중에 따른 균열길이를 구하여 에너지 방출률을 계산하였다. 이때, 균열길이 변화에 따른 초음파 감쇠계수를 측정하였다. 초음파 탐상기(Sitescan 240)와 탐촉자는 진동자 직경 10mm, 주파수 4MHz의 수직탐촉자를 사용하였고, 접촉매질은 글리세린을 사용하였다. DCB 접착부재 시험편에서의 계면

균열 길이에 따른 음압 차는 대비 시험편에서의 음압과 초음파 탐상에서 발생하는 제1회 반사 에코와 제2회 반사 에코의 비로 계산하였다.

3. 에너지 방출률과 초음파 감쇠계수

3.1 컴플라이언스와 에너지 방출률

에너지 방출률은 컴플라이언스를 실험에서 직접 측정하여 구할 수 있다. 두께 B, 균열길이 a인 탄성체에 정적하중 P가 작용하여 균열이 da만큼 진전하였을 때 하중-하중점 변위선도에서 컴플라이언스 C와 변위 δ는 다음 식과 같이 된다.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (1)$$

또한, 에너지 방출률 G와 컴플라이언스 C는 다음 식으로 표시된다.

$$G = \frac{dU}{dA} = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2)$$

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

3.2 초음파 감쇠계수

초음파가 매질에 입사할 때 감쇠에 의한 음압의 변화는 지수 함수에 의해 감소한다.

ASTM E.664-78에서 접촉매질이 초음파 감쇠에 영향이 전혀 고려되지 않은 결보기 감쇠계수(α_0)는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\alpha_0 = 20 \frac{1}{2H} \log \frac{F_0}{F_n} \quad (3)$$

여기서, F_0 는 초기 음압, F_n 은 거리 n만큼 전반사 하였을 때의 음압을 나타내고, H는 시험편의 높이이다.

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.

$$\alpha = 20 \frac{1}{4H} \log [r_c^2 r_m^2 \cdot$$

$$\left| \frac{F_n}{F_{n+1} - F_{n+2}} - \frac{F_{n+1} - F_{n+2}}{F_{n+2} - F_{n+3}} \right| \quad (4)$$

여기서, r_c 는 접촉매질에서의 음압반사율, r_m 는 모재에서의 음압반사율을 나타낸다.

식 (4)는 선형 초음파의 관점에서 해석한 것으로 균질재의 초음파 감쇠계수를 결정하는 데 사용되며, 본 실험에서는 식 (4)를 적용하였다.

3.3 초음파 음압반사율과 통과율

초음파가 매질에 수직 입사할 때 반사 및 통과는 각 재질의 음향 임피던스에 따른 음압을 고려하여야 한다. 따라서, Fig. 2에서 음파가 서로 다른 음향 임피던스의 매질로 입사할 때 발생하는 음압반사율은 다음 식과 같이 된다.

$$r_c = \frac{(Z_1/Z_2 - Z_2/Z_1)}{\sqrt{4 \cot^2 kh + (Z_1/Z_2 + Z_2/Z_1)^2}} \quad (5)$$

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

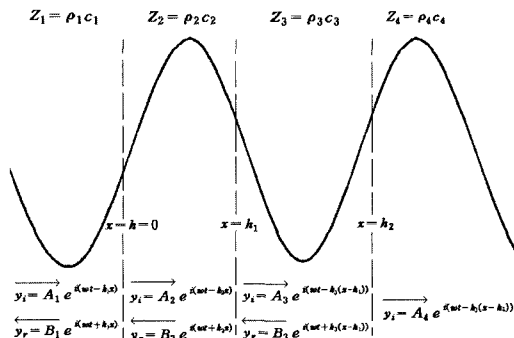


Fig. 2 Diagram of incident and reflected ultrasonic waves on adhesive interfaces

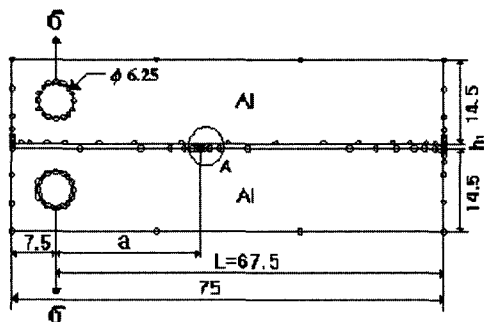


Fig. 3 Typical mesh pattern of BEM model

여기서, $k=2\pi/\lambda$, $\lambda=C/f$, λ 는 파장, C 는 재질의 속도, h 와 h_1 은 각각 접촉매질층 및 접착층의 두께, f 는 주파수, Z_i 는 각 재질의 음향 임피던스를 나타낸다.

또한, Fig. 2와 같이 접촉매질층, 모재와 접착층을 고려하였을 때, 음압통과율(t)은 다음 식과 같이 유도된다.

$$t = \frac{2Z_1/Z_4}{B^* + C^* + D^* - E^*} \quad (6)$$

여기서,

$$B^* = (Z_1/Z_4 + 1) \cos k_2 h_1 \cdot \cos k_3 (h_2 - h_1),$$

$$C^* = i(Z_1/Z_2 + Z_2/Z_4) \sin k_2 h_1 \cdot \cos k_3 (h_2 - h_1),$$

$$D^* = i(Z_1/Z_3 + Z_3/Z_4) \cos k_2 h_1 \cdot \sin k_3 (h_2 - h_1),$$

$$E^* = (Z_1/Z_2 \cdot Z_3/Z_4 + Z_2/Z_3) \sin k_2 h_1 \cdot \sin k_3 (h_2 - h_1)$$

3.4 경계요소 해석과 Ripling 식

Fig. 3은 Fig. 1의 DCB 접착부재 시험편에 대한 경계요소(BEM) 해석모델을 도시한 것이다. 해석모델은 Fig. 1에 대한 실제 시험편의 치수를 1/2로 축소한 것으로 균열 길이를 변화시켜 가면서 하중점에 대한 변위를 구하고, 이 해석결과로부터 컴플라이언스를 계산하였다. 본 경계요소 해석은 Kelvin의 기본해를 사용한 2차원 탄성해석이고, 모델의 요소분할은 접착체의 경우 각각 2개 영역, 접착층은 1개 영역으로 하여 모델 전체의 절점수는 326개로 분할하였다.

경계요소 해석에 의한 컴플라이언스의 계산결과에의 정밀도를 검증하기 위하여 Ripling의 식과 비교하였다. Ripling의 식은 접착층이 없는 균질재의 DCB 접착이음 시험편에 대한 컴플라이언스의 근사식이지만, DCB 접착이음에 대한 컴플라이언스의 계산에도 널리 사용되고 있는 식으로 다음과 같이 표시된다.¹⁷⁾

$$C = \frac{1}{3EI} [(a+a_0)^3 + H^2 a] \quad (7)$$

여기서, E 는 접착체의 세로탄성계수, I 는 단면 2차 모멘트, H 는 접착체의 높이, $H^2 a$ 는 전단에 의한 수정량, a 는 균열길이이다. a_0 는 시험편의 회전 보정량으로 Ripling은 $a_0 = 0.6 H$ 로 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 DCB 접착부재의 컴플라이언스

Fig. 4는 실험에서 측정된 하중과 하중점의 변위를 사용하여 컴플라이언스를 구한 후, 계면균열 길이의 변화에 대한 컴플라이언스와 경계요소 해석 및 Ripling의 식을 비교하여 나타내었다.

실험에서 구한 값이 미소한 값으로 편차를 보이는 것은 얇은 접착층의 두께의 영향, 재료 물성치, 음의 중복 현상 등의 영향으로 볼 수 있다. 또한, 경계요소 해석결과가 Ripling의 식과 차이를 보이는 것은 Ripling의 식은 균질재에 대한 식인 것을 감안한다면 경계요소 해석결과가 실제의 접착 상황을 더욱 잘 반영하는 것으로 고려된다.

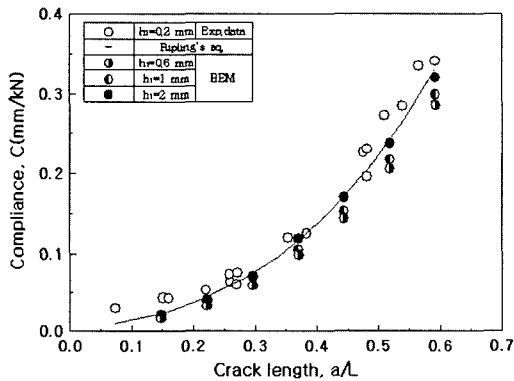


Fig. 4 Relation between compliance and interfacial crack length

4.2 DCB 접착부재의 에너지 방출률

DCB 접착부재 시험편에 대한 실험결과인 Fig. 4의 컴플라이언스와 경계요소 해석 및 Ripling의 식을 식 (2)에 대입하여 에너지 방출률을 계산하였다.

Fig. 5는 실험값과 경계요소 해석 및 Ripling의 식에 대한 에너지 방출률을 비교·도시하였다. 실험에 의한 에너지 방출률은 균열길이 증가할수록 차이가 커지는 것은 균열길이 길어지면 균열선단에서 하중점의 회전량이 커지기 때문이다.

Fig. 6은 접착부재에서 계면균열이 진전하였을 때 초음파 에코를 나타내고 있다. 계면균열이 진전할수록 음압의 현저한 차이로 인해 초음파 에코가 감소한다.

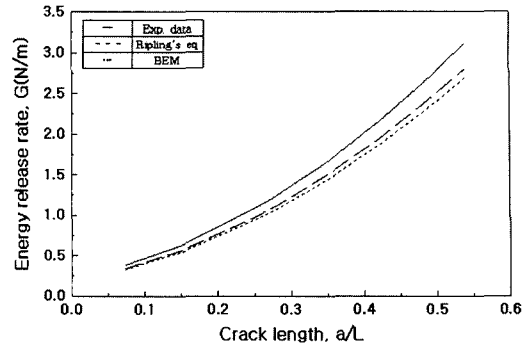
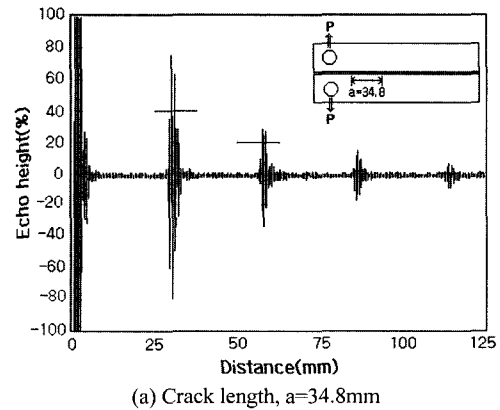
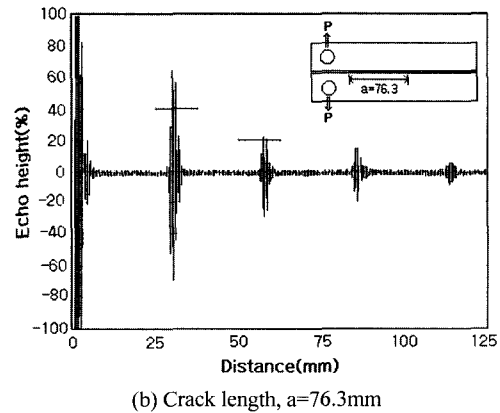


Fig. 5 Relation between energy release rate and interfacial crack length



(a) Crack length, a=34.8mm



(b) Crack length, a=76.3mm

Fig. 6 Ultrasonic waveform from interfacial crack of adhesively bonded DCB specimens

4.3 균열길이와 초음파 에코의 비

Fig. 7은 실험에 의한 컴플라이언스 및 초음파 에코의 비와 계면균열 길이를 무차원하여 나타내었다. 균열길이가 증가할수록 컴플라이언스도 증가하

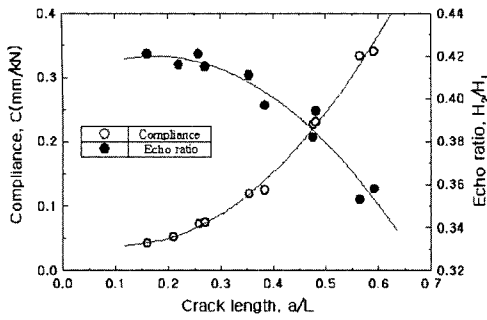


Fig. 7 Relation between compliance and echo ratio versus interfacial crack length

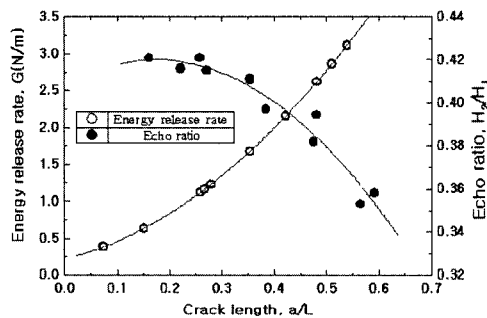


Fig. 8 Relation between energy release rate and echo ratio versus interfacial crack length

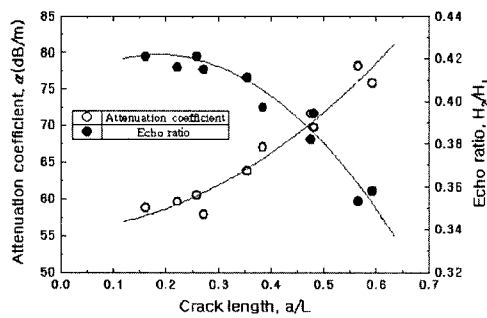


Fig. 9 Relation between attenuation coefficient and echo ratio versus interfacial crack length

지만, 초음파 에코의 비는 감소한다. 또한, 균열이 진전할 때 발생하는 에너지 방출률은 Fig. 8에서 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. 9는 계면균열 길이에 따른 초음파 감쇠계수와 에코 비의 관계를 나타내고 있다. 초음파 감쇠계수가 증가할수록 초음파 에코의 비는 상대적으로

감소하는 반비례 관계를 알 수 있다.

4.4 계면균열 길이와 초음파 감쇠계수

Fig. 10은 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 나타낸 것이다. 초음파 감쇠계수가 증가할수록 에너지 방출률도 직선적으로 증가한다.

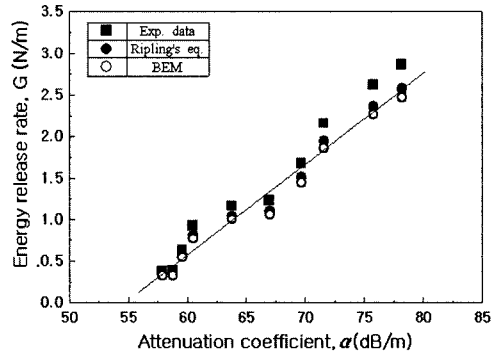


Fig. 10 Relation between energy release rate and attenuation coefficient

실험과 경계요소 해석 및 Ripling의 식에 의해 구하여진 에너지 방출률(G)과 초음파 감쇠계수(α)의 관계를 유도하면 다음 식과 같다.

$$G = 0.109\alpha - 5.972 \quad (8)$$

Fig. 11은 계면균열 길이에 대한 초음파 감쇠계수의 관계를 도기한 것이다. 초음파 감쇠계수가 증가할수록 균열길이도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 초음파 감쇠계수가 증가한다는 것은 초음파의 에코 비가 상대적으로 감소함을 의미한다.

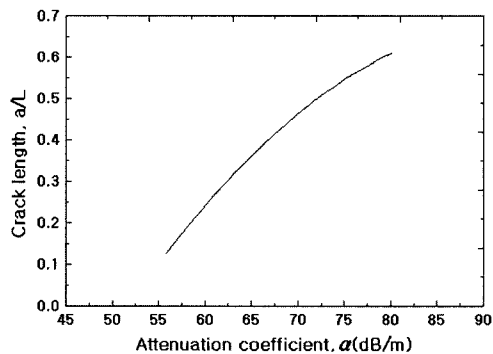


Fig. 11 Relation between attenuation coefficient and interfacial crack length

계면균열 길이와 에너지 방출률, 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 이용하여 균열길이와 초음파 감쇠계수의 관계를 유도하면 다음 식과 같이 된다.

$$\alpha = 58.872\left(\frac{a}{L}\right)^2 + 14.829\left(\frac{a}{L}\right) + 51.451 \quad (9)$$

$$\frac{a}{L} = -0.0003\alpha^2 + 0.0718\alpha - 2.6972$$

따라서, 초음파 감쇠계수를 측정하면 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 균열길이를 구할 수 있고, 에너지 방출률과 이들의 상호관계를 측정할 수 있다.

5. 결론

DCB 접착부재 시험편에 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) 계면균열 길이에 따른 에너지 방출률은 서로 비례 관계이고, 초음파 감쇠계수가 증가할수록 에너지 방출률도 직선적으로 증가한다.
- 3) 계면균열 길이가 길어질수록 초음파 감쇠계수는 곡선적으로 증가하고, 초음파 에코의 비는 상대적으로 감소한다.
- 4) 초음파 감쇠계수를 측정하면 계면균열 길이를 구할 수 있고, 에너지 방출률과 이들 상호관계를 측정할 수 있다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- 1) N. Y. Chung, S. I. Park, M. D. Lee, C. H. Park, "Ultrasonic Detection of Interface Crack in Adhesively Bonded DCB Joints," *IJAT*, Vol.3, No.4, pp.157-163, 2002.

- 2) N. Y. Chung, C. H. Song, "Prediction of Propagation Path for the Interface Crack in Bonded Dissimilar Materials," *Transactions of KSAE*, Vol.4, No.3, pp.112-121, 1996.
- 3) N. Y. Chung, S. I. Park, M. D. Lee, "Detection of Interface Crack Using Ultrasonic Method in Adhesively Bonded Joint," *Transaction of the KSME*, Vol.25, No.3, pp.415-423, 2001.
- 4) R. A. Kline, C. P. Hsiao, "Nondestructive Evaluation of Adhesively Bonded Joint," *Trans. ASME*, July, pp.214-217, 1986.
- 5) Z. Derouiche, "Ultrasonic Characterization of Heterogeneous Materials Using a Stochastic Approach," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol.97, No.4, pp.2304-2315, 1996.
- 6) H. D. Jeong, H. J. Shin, "Detection of Defects in a Thin Steel Plate Using Ultrasonic Guided Wave," *J. KSNT*, Vol.18, No.6, pp.445-453, 1998.
- 7) S. J. Song, J. U. Choe, H. J. Kim, "A Study on Elastic Wave Propagation for Nondestructive Evaluation of Composite Structures-An Experimental Approach," *Transaction of the KSME*, Vol.22, No.6, pp.978-989, 1998.
- 8) S. Moriyama, K. Kimura, "Effect of Surface Roughness on Sensitivity of Ultrasonic Normal Beam Testing," *J. JSNT*, Vol.47, No.5, pp.315-321, 1998.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) C. Pecorari, "Attenuation and dispersion of Rayleigh Waves Propagation on a Crack Surface : an Effective Field Approach," *Ultrasonic*, Vol.38, pp.754-760, 2000.

- 13) M. Castings, B. Hosten, "Lamb and SH Waves Generated and Detected by Air-Coupled Ultrasonic Transducers in Composite Material Plates," NDT&E International, Vol.34, pp.249-258, 2001.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) H. Ping, "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using both Transmitted and Reflected Pulses," Ultrasonics, Vol.39, pp.27-32, 2001.
- 17) E. J. Rippling's, S. Mostovoy, R. L. Patrick, "Measuring Fracture Toughness of Adhesive Joints," Materials Research Standard, Vol.4, pp.129-134, 1964.