

펄스-에코법을 이용한 접착접합 시험편의 정량적비파괴평가

오승규*, 황영택**, 이 원***

Quantitative Nondestructive Evaluation of Bonded Joints utilizing Pulse-Echo Ultrasonic Test

Seung Kyu Oh*, Yeong Taik Hwang** and Won Yi***

ABSTRACT

The pulse-echo method is one of the most widely used ultrasonic techniques for application of nondestructive evaluation. Particularly, quantitative nondestructive evaluation of defects has been considered more important to assure the reliability and the safety of structure. Frequency energy in adhesive joints is based on the ultrasonic wave analysis. The attenuation coefficient upon wave amplitude and the frequency energy that is expressed in the term of wave pressure amplitude were utilized for the primary wave experiment. By means of a control experiment, it was confirmed that the variation of the frequency energy in adhesive joints depends on transition by stress variation. In this paper, the ultrasonic characteristics were measured for single lap joint and Double Cantilever Beam specimen with different fracture modes that was subjected to stress. Consequently, the data that was obtained from the adhesive specimen was analytically compared to the fracture mechanics parameter

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), Structural Bonded Joint(구조접착접합이음), Stress Intensity Factor (응력세기계수), Frequency Energy Density(주파수에너지밀도)

1. 서론

자동차구조용 박판강의 이음 부분에 대한 구조 접착제의 사용은 전통적인 점용접 기술의 관점에서 볼 때 경비절감, 진동흡수성, 절연성 등과 같은 여러가지 장점을 제공하고 있다. 또, 재료에 열을 가할 수 없는 이음 영역에 적용할 수 있으며, 점용접의 경우 보다 균일한 응력분포를 가지게 할 수 있다.

일반적으로 비파괴적인 실험법은 접착접합이음의 정밀검사를 위하여 적용할 수 있으며¹, 특히, 펄스-에코 송신기술이 이음의 결함을 검출하기 위해 사용되고 있다.

Dickstein 등은² 기계적성질과 초음파 신호를 연관시키기 위하여 초음파에코를 분석하였다. 주파수 응답에 기초를 두고 있는 스펙트럼분석 기술³은 국소 강성에 의해 영향을 받으며, 음속-초음파 기술⁴은 전송된 신호의 파워스펙트럼이 결함의 표면에

*** 2002년 7월 16일 접수

* 숭실대학교 기계공학과 대학원

** 삼척대학교 정밀기계공학과

*** 숭실대학교 기계공학과

의해 영향을 받음을 확인하고, 이것을 이음 강도라고 규정하고 있다.

정량적비파괴평가⁵⁻⁸를 위한 가장 손쉬운 방법으로는 파괴역학의 응용을 들 수 있다. 파괴역학의 응력세기계수 K 값은 파괴를 결정짓는 중요한 파라미터이다. 초음파법 중에서 펄스-에코법은 이음의 결함을 검출하기 위해 적용되고 있다. 이러한 기술은 단지 결함의 유무만을 검출할 수 있었으나, 최근 펄스-에코의 파형을 분리하여 응력파의 상관관계를 해석하려는 연구가 Benson⁹ 등에 의해 시도되었다.

본 연구의 목적은 파괴모드가 다른 단순접치기 접착시험편 및 DCB 시험편의 접착이음에 대하여 각각의 응력에 따른 초음파 신호를 획득하고 파형 해석을 통하여 파괴역학 파라미터와의 상관관계를 비교·분석하는 것이다.

2. 관련 이론

2.1 선형이론의 파동방정식

일차원응력상태에서 선형이론에 의한 일차원파동방정식¹⁰은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서, C_L 은 종파의 음속을 뜻한다.

파동방정식의 d'Alembert 해는 식(2)와 같이 표현할 수 있으며, 우측의 첫 번째항은 입사파이고, 두 번째항은 반사파를 의미한다.

$$\begin{array}{c}
 f\left(t - \frac{x}{C_L}\right) \Bigg| \Bigg| h\left(t - \frac{a}{C_L} - \frac{x-a}{C_L^A}\right) \\
 \Rightarrow \quad \Rightarrow \\
 g\left(t - \frac{a}{C_L} + \frac{x-a}{C_L}\right) \Bigg| \Bigg| \\
 \left(\rho C_L\right) \quad x = a \quad \left(\rho^A C_L^A\right)
 \end{array}$$

Fig. 1 Incident, reflected and transmitted waves by one-dimensional motion of an elastic continuum

$$u(x, t) = f\left(t - \frac{x}{C_L}\right) + g\left(t + \frac{x}{C_L}\right) \quad (2)$$

Fig.1과 같이 탄성파가 기계적 성질이 다른 두 매질 사이를 통과하는 경우, 경계층에서는 다음과 같이 응력파로써 입사파, 반사파, 투과파로 분류할 수 있다.

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{입사파 } (\sigma_x)_i = f\left(t - \frac{x}{C_L}\right) \\
 \text{반사파 } (\sigma_x)_r = g\left(t - \frac{a}{C_L} + \frac{x-a}{C_L}\right) \\
 \text{투과파 } (\sigma_x)_t = h\left(t - \frac{a}{C_L} - \frac{x-a}{C_L^A}\right)
 \end{array} \right\} \quad (3)$$

두 매질이 인접하고 있는 경우의 경계층 $x = a$ 에서는

$$\left. \begin{array}{l}
 (\sigma_x)_r = C_r f\left(t - \frac{a}{C_L} + \frac{x-a}{C_L}\right) \\
 (\sigma_x)_t = C_t f\left(t - \frac{a}{C_L} - \frac{x-a}{C_L^A}\right)
 \end{array} \right\} \quad (4)$$

여기서, C_r 은 반사계수(reflection coefficient)이고, C_t 는 투과계수(transmission coefficient)이다.

2.2 초음파 파형의 파라미터

2.2.1 초음파 파형의 주파수 에너지밀도

Fig.2(a)는 단순접치기 접착접합 이음의 초음파 탐상을 나타내고 있으며, Fig.2 (b)는 여기에 대응하여, 피착체를 관통하는 초음파 파형의 진행경로를 나타내고 있다. 재료내를 진행하는 초음파는 계면에서 반사 및 투과를 반복하며 그 크기는 Fig.3과 같이 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타낸다⁽¹¹⁾. 이것은, 접착계면에서 급격한 응력상승이 일어난다면, 제 1피착체(알루미늄)의 임피던스 증가보다도 제 2피착체(접착제)의 강성변화가 크기 때문에 반사계수에 비하여 투과계수가 커지며, 접착계면에서 반사된 반사파형의 음압은 감소하게 된다.

$$I = I_0 e^{-2ax} \quad (5)$$

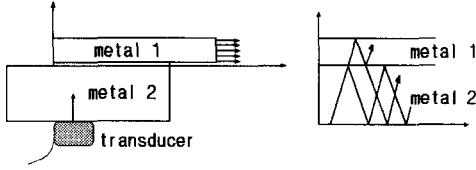


Fig. 2 Signal analysis classification of adhesive joints

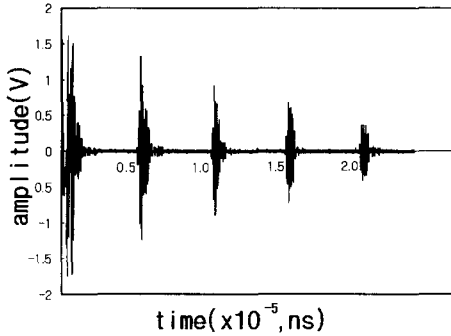


Fig. 3 A-scan of single lap adhesive joints

여기서, α 는 감쇄계수이다. 주파수에너지는 음압의 진폭으로 표현할 수 있으며, 다음과 같다.

$$I = \frac{PV}{2} = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{\rho c V^2}{2} = P_{rms} V_{rms} = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \quad (6)$$

여기서,

ρ : 밀도(kg/mm³)

c : 음속(m/s)

I : 주파수에너지(V·cm·s/kg)

P : 음압의 진폭(dB)

V : 입자속도의 진폭(s)

P_{rms} : 음압의 실효치(dB)

V_{rms} : 입자속도의 실효치(s)

초음파의 파형은 운동에너지와 압축·팽창에 따른 위치에너지의 합으로써 파형의 에너지 전파현상이라고 할 수 있다. 또한, 주파수에너지밀도(frequency energy density)는 한 점에서의 단위부피당 파형에너지를 뜻하므로, 종파의 음압이 P 인 경우의 에너지밀도 시간평균치 e 는 다음과 같이

정의할 수 있다⁽¹²⁾.

$$e = \frac{P^2}{\rho c^2} \quad (7)$$

2.2.2 초음파 감쇄계수

초음파감쇄는 결정입자 및 조직에 의한 산란, 점성감쇄, 전위운동에 의한 감쇄, 잔류응력에 의한 산란 등이 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{x_2 - x_1} 20 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \\ &= \frac{1}{x_2 - x_1} 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, x_1, x_2 는 음파의 진행거리를 나타낸다.

2.3 파괴역학 파라미터

2.3.1 단순겹치기 접착이음에 대한 응력세기 계수

Fig. 4와 같은 단순겹치기 접착이음에 대한 2차원문제는 Mukai⁽¹³⁾에 의해 해석적으로 다음과 같이 알려져 있다.

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \tau \sqrt{\pi a} \left[0.770 \left(\frac{a}{b} \right)^{0.397} \right] \\ K_{II} &= \tau \sqrt{\pi a} \left[\frac{2}{\pi} + 0.365 \left(\frac{a}{b} \right)^{0.7101} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$K_i = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (10)$$

여기서, K_i 는 인장과 면내전단에 의한 파괴모드이며, $2a$ 는 접합부 길이, $2b$ 는 판두께, τ 는 인장전단하중을 받는 접합부의 평균전단 응력이다.

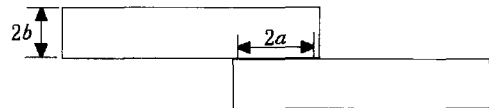


Fig. 4 Schematic shape of single lap joints test specimen

2.3.2 DCB접착시험편에 대한 파괴인성치

균열의 평가는 일반적으로 응력세기계수 K 를 이용하고 있지만, 접착이음에서의 균열은 혼합모드이기 때문에, 일반적으로는 에너지해방율 G 로써 평가하고 있다. Fig. 5는 DCB시험편의 초음파 탐상도이며, 이에 대한 A-Scan 모드가 Fig. 6이다. DCB(double cantilever beam)시험편은 모드 I 균열이 되고, 에너지해방율 G_I 는 컴플라이언스의 변화에 의해 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (11)$$

여기서, 컴플라이언스는

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

여기서, P 는 하중, B 는 폭, C 는 컴플라이언스, a 는 균열길이, δ 는 하중점 균열개구 변위를 나타낸다.

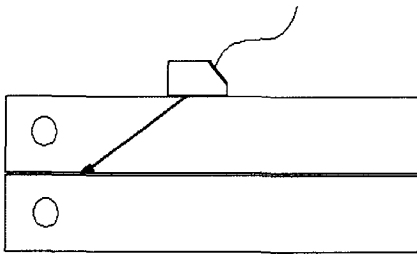


Fig. 5 Schematic shape of adhesive bonded DCB test specimen

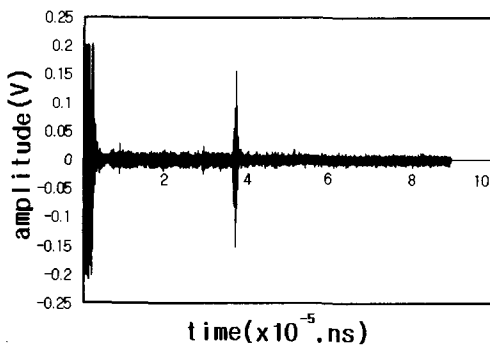


Fig. 6 A-scan of DCB adhesive joints

3. 초음파실험

3.1 시스템의 구성

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결합 신호를 송·수신하는 종파용 탐촉자(주파수 10MHz, 진동자 크기 : 10mm), 횡파용 탐촉자(45°, 주파수 10MHz, 진동자 크기 : $\phi 10$), 접촉매질(글리세린) 등이다. Table 1, Table 2, Table 3은 각각 시험편의 기계적 성질과 초음파특성을 나타내고 있다.

Table 1 Ultrasonic characteristics of materials

medium	density ρ (10^3 kg/m^3)	velocity of longitudinal wave C (m/s)	impedance Z ($10 \text{ kg/m}^2\text{s}$)
Air	0.013	344	0.0004
Al 6061	2.72	6,154	16.74
Cemedine	1.07	4,620	4.94
Glyceline	1.26	1,920	2.42

Table 2 Mechanical properties and test requirement of specimen (SLJ)

adherend and adhesive	adherend thickness $t_1 \times t_2$ (mm)	bonding area A (mm^2)	bonding thickness t_a (mm)	E(GPa)	ν
Al 6061	8mm×8mm 12mm×12mm 16mm×16mm	25×25 mm^2	-	67.29	0.34
Cemedine	-	-	0.3 mm	1.16	0.39

Table 3 Specimen and test requirement (DCB, Al 5052)

adherend thickness $t_1 \times t_2$ (mm)	adherend width (B, mm)	pre-crack (a, mm)	bonding thickness (t_a , mm)
16×16	0.20	15	0.3

3.2 접착시험편

단순겹치기 접착이음의 시험편은 Al 6061이며, DCB 시험편은 Al 5052를 사용하였고, 피착체는 페이퍼로 표면 가공 후, 아세톤으로 세정작업을 하였다. 이어서, 시험편을 두께 0.3mm의 테프론 필름을 이용하여 Cemedine 1500으로 접착, 전기로에서 80℃로 2시간 온도를 유지 후 냉각하여 시험편으로 사용하였다.

3.3 초음파 신호획득 및 주파수해석

초음파 트랜스듀서로부터 발생된 펄스는 두 계면사이에서 반사파와 투과파로 분해된다. 초음파 파형의 감쇄계수 및 주파수에너지 밀도분석은 제 1 반사파를 이용하여 파형을 분리하였으며, 실험에 의한 신호는 1 point 당 2ns의 간격으로 샘플링하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 단순겹치기 접착이음 평가(Al 6061)

4.1.1 응력세기계수와 감쇄계수의 비교분석

Fig. 7은 응력증가에 따른 응력세기계수와 감쇄계수와의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에서 기울기는 피착체두께 8mm×8mm에서 응력세기계수가 2 MPa·mm^{1/2}까지는 감쇄계수의 편차가 그리 크지 않으나, 이후의 응력세기계수 증가에 따라 감쇄

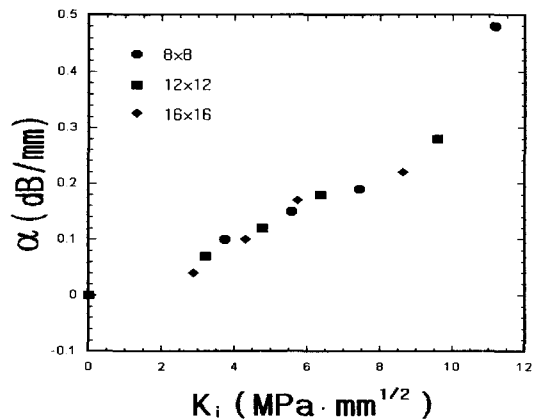


Fig. 7 Comparison of stress intensity factor and attenuation coefficient

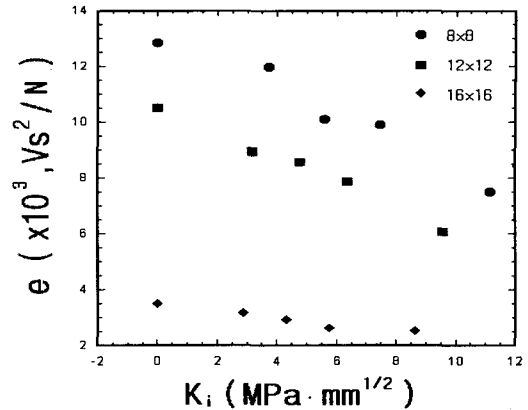


Fig. 8 Comparison of stress intensity factor and frequency energy density

계수가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 이종재료의 계면에 대한 응력상승은 강성이 적은 재료에서의 밀도변화가 더욱 크기 때문에 반사계수에 대한 투과계수가 더 커지므로 감쇄가 커지는 것으로 이해할 수 있다. 또한, 12mm×12mm, 16mm×16mm의 피착체에서도 동일한 결과를 얻었다. 따라서, 계면응력의 영향에 의해 초음파 감쇄계수는 응력세기계수가 증가할수록 기울기가 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 박판의 두께가 얇을수록 그 기울기가 더욱 커짐으로써 감쇄계수와 응력세기계수의 관계를 확인할 수 있다.

4.1.2 응력세기계수와 주파수에너지밀도의 비교분석

Fig. 8은 응력증가에 따른 응력세기계수와 주파수에너지밀도와의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에서 응력세기계수의 증가에 따라 주파수에너지밀도가 선형적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있으며, 피착체의 두께가 12mm×12mm, 16mm×16mm보다 8mm×8mm의 두께에서 그 기울기는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이것은 재료내부의 응력변화에 따른 임피던스의 변화는 초음파 종파의 경우에 재료의 탄성계수와 밀도변화에 따라 크게 변화한다⁽¹⁴⁾는 기존의 연구결과와 같은 결과라고 볼 수 있다. 그러므로, 피착체 두께가 적을수록 재료내부에 대한 응력상승이 커지고, 이에 따른 임피던스의 증가 또한 커짐을 알 수 있다. 따라서, 단순겹치기 접착이음의 경우에 계면에서 응력의 변화는 파피역학

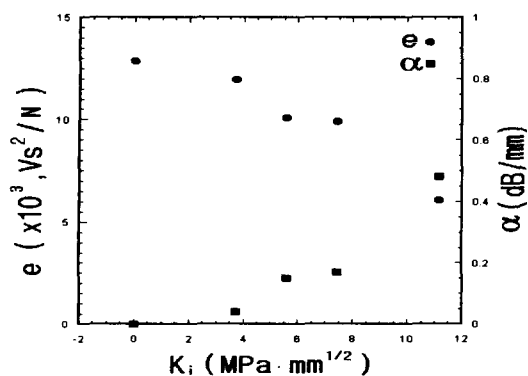


Fig. 9 Wave analysis on stress intensity factor (8mm×8mm)

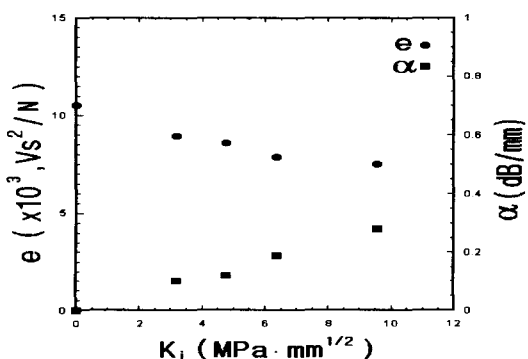


Fig. 10 Wave analysis on stress intensity factor (12mm×12mm)

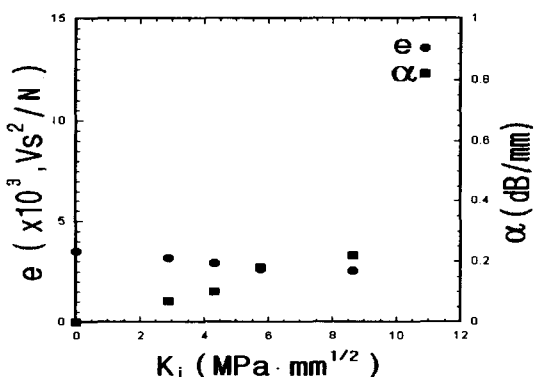


Fig. 11 Wave analysis on stress intensity factor (16mm×16mm)

파라미터인 응력세기계수와 비파괴파라미터인 주파수에너지밀도의 파형변화를 분석함으로써 계면에서의 응력상태를 파악할 수 있으며, 이를 통해 정량적비파괴의 평가가 가능함을 확인하였다.

4.1.3 응력세기계수에 대한 주파수에너지밀도와 감쇠계수의 상관관계 비교분석

Fig. 9~Fig. 11은 응력세기계수에 대한 초음파주파수 파형의 에너지밀도와 감쇠계수를 나타낸 그림이다. 피착체의 두께에 따른 응력세기계수의 변화는 주파수에너지밀도와 감쇠계수가 서로 상반되는 결과를 가지며, 특히 피착체의 두께가 얇을수록 응력의 변화가 크기 때문에 재료내부의 밀도변화가 크므로, 주파수의 에너지밀도 변화가 파괴역학 파라미터와 상관성이 매우 높은 것을 확인하였다. 따라서, 피착체 계면에서 발생하는 응력의 분포상태를 비파괴적으로 알 수 있음을 확인하였다.

4.2 DCB 시험편에 대한 평가(AI 5052)

4.2.1 에너지해방율과 초음파 주파수에너지 밀도 비교

Fig. 12는 에너지해방율과 주파수에너지밀도를 상호비교한 그래프이다. DCB 시험편을 이용한 인장시험에서 파괴모드는 모드 I으로써 그래프에서는 에너지해방율이 약 147kN/m까지는 주파수에너지밀도의 변화가 거의 미약하지만, 이 지점을 지나면서 하중증가에 따라 변위가 줄어들고, 주파수파형의 에너지밀도 변화가 발생되기 시작한다. 그리고, 이 지점을 지나면서 피착체의 계면에서 박리가 발생됨과 동시에 주파수에너지 밀도파형에 대해 에너지해방율은 255kN/m지점에서 급격히 상승하며 균열이 발생함을 확인할 수 있었다. 이러한 사실은 초음파 주파수 밀도파형의 해석으로도 확인할 수 있었다. 특히, 에너지해방율이 약 196kN/m가 되는 지점에서 주파수밀도파형이 감소하다가 균열이 발생 직후에 주파수파형의 에너지밀도가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 이것은 계면에서의 균열시작 직전까지의 초음파 반사파의 변화가 제1피착체(알루미늄)에서는 제2피착체(접착제)에 비하여 응력변화가 매우 적으며, 균열시작과 함께 작용하중이 크게 증가하기 때문으로 해석할 수 있다.

4.2.2 에너지해방율과 초음파 감쇠계수의 비교분석

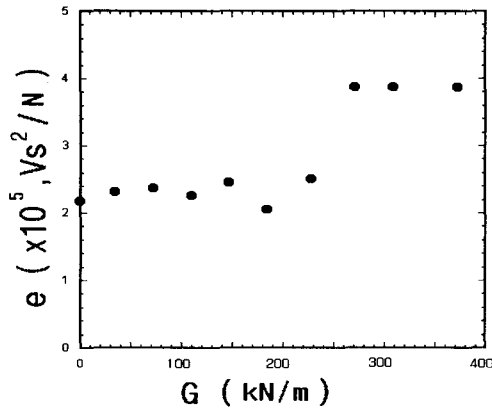


Fig. 12 Comparison of energy release rate vs. frequency energy wave density

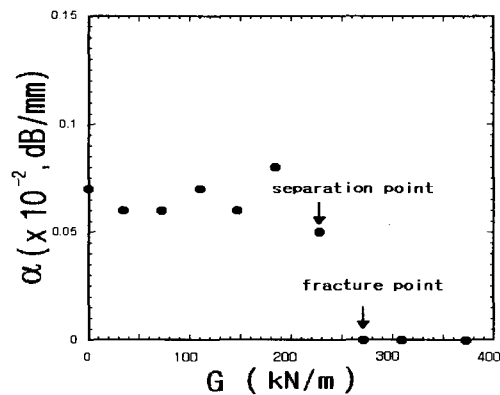


Fig. 13 Comparison of attenuation coefficient vs. energy release rate

Fig. 13은 초음파감쇄계수와 에너지해방율을 비교·분석한 그래프이다. 초음파감쇄계수의 변화도 Fig. 12와 마찬가지로 에너지해방율이 196kN/m 지점에서 증가하다가 245kN/m 지점에서 감소함을 확인하였으며, 이 지점에서 균열의 발생을 확인하였다. 이는 에너지해방율이 196kN/m에서 응력집중이 가장 크게 걸리는 상태이며, 변위의 변화는 이 지점에서 가장 작다는 것을 의미한다. 그리고, 계면에서의 균열이 발생함과 동시에 두 계면에 대한 상대 변위에 대한 응력이 사라지므로 반사파의 진폭이 제1피착체의 반사파 진폭과 같아지므로 감쇄가 작아지는 것으로 파악할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파의 파형해석을 통하여 접착이음의 접합강도에 영향을 미치는 파라미터를 규명하기 위해, Al 6061 단순접치기 접착시험편의 인장-전단강도 및 Al 5051 DCB 모드 I 접착접합 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하고, 초음파 파형 파라미터와 파괴역학 파라미터와의 상관관계를 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단순접치기 접착이음에서의 계면균열 선단에 대한 파괴역학 파라미터인 응력세기계수가 증가할수록 초음파파형의 주파수에너지밀도가 감소함을 보이며, 이는 초음파의 파형이 계면에서 응력이 증가함에 따라 임피던스가 증가하기 때문이다.

(2) 단순접치기 접착이음에서의 계면균열 단에 대한 감쇄계수의 증가는 접착접합이음 부위의 응력이 증가하는 것에 대응하며, 접착접합이음의 파괴역학 모델을 설명하는데 유용한 상관인자가 될 수 있음을 확인하였다.

(3) DCB Mode I 시험편에 대한 에너지해방율 시험에서 균열영향에 의한 접착이음부 분리를 초음파 파형해석으로 확인하였다. 또한, 감쇄계수는 균열이 발생하는 시점에서 급격히 떨어짐을 알 수 있었다.

(4) 피착체의 두께가 얇을수록 동일하중에 대하여 계면단에서의 응력증가에 따라 응력세기계수가 증가함과 동시에 감쇄계수의 증가와 초음파파형의 에너지밀도가 감소함을 확인하였다.

참고문헌

1. Adams, R. D. and Drinkwater, B. W., "Non-destructive testing of adhesively-bonded joints," NDT International, Vol. 30,2, pp. 93-98, 1997.
2. Dickstein, P., Spelt, J. and Sinclair, A., "Application of higher order crossing feature to non-destructive evaluation : A sample demonstration of sensitivity to the condition of adhesive joints," Ultrasonics, Vol. 29, pp. 355-365, 1991.
3. Guyott, C. and Cawley, P., "Evaluation of the cohesive properties of adhesive joints using ultrasonic spectroscopy," NDT International, Vol. 21, No. 4, pp. 233-240, 1991.

4. Tiwari, A., Henneke, E. H. and Duke, J., "Acousto-ultrasonic technique for assuring adhesive bond quality," *J. of Adhesion*, Vol. 34, pp. 1-15, 1991.
5. 김정표, 석창성, 김영환, 송성진, "선형 및 비선형 초음파를 이용한 1Cr-1Mo-0.25V 의 열화평가에 관한 연구," *한국비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 5, pp. 549-555, 2001.
6. 오승규, 황영택, 장철섭, 이 원, "접착접합 계면에 대한 초음파시험과 응력해석," *대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A)*, pp. 361-366, 2002.
7. 김진오, 이영춘, "선 집속 초음파 현미경을 이용한 음탄성효과 측정에 의한 응력 평가," *한국정밀공학회지*, Vol. 14, No. 10, pp. 119-126, 1997.
8. 이서일, 이준현, "경계요소법을 이용한 초음파 산란장 해석에 관한 연구," *한국비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 2, pp. 130-137, 2000.
9. Benson, R. W. and Raelson, V. J., "Acousto-elasticity," *Product Engineering*, pp. 56-59, 1959
10. Achenbach J. D., "Wave Propagation In Elastic Solids," North-Holland, pp. 21-29, 1993.
11. 根庵勝雄, 高木賢志郎, "超音波技術," 東京大學出版會, pp. 151-152, 1989.
12. 한국소음진동공학회, "소음진동편람," pp. 7, 1995.
13. Chang, D. J. and Muki, R., "Stress distribution in a lap joint under tension-shear," *Int. J. Solids and Structure*, Vol. 10 pp. 503-517, 1974.
14. 이상국, 정민화, "초음파법에 의한 발전소 고온 배관 재료의 크리프손상 평가," *한국해양공학회지*, Vol. 13, No. 2, pp. 99-107, 1999.