

열응력이 발생하는 접착이음부에서의 초음파 신호처리기법을 이용한 강도평가

오승규* · 황영택* · 장철섭* · 오선세* · 이 원**

Strength evaluation of adhesive joint with thermal stress using ultrasonic signal processing method

Oh Seung Kyu*, Hawng Yeong Taik*, Jang Chul Sub*, Oh Sun Sae*
and Yi Won**

Key Words: Ultrasonic Wave(초음파), Signal Analysis(신호해석), Adhesively Bonded Joint(접착접합이음), Stress Intensity Factor(응력세기계수)

Abstract

One approach to testing the suitability of an adhesive joint for a particular application is to build and test to destruction a representative sample of the joint. The nondestructive test will not measure strength directly but will measure a parameter which can be correlated to strength. It is therefore, essential that a suitable nondestructive test is chosen and that its results are correctly interpreted. In this paper, typical defects found in adhesive joints are described together with their significance. The limits and likely success of current physical nondestructive tests are described, and future trends outlined.

기호설명

K : Stress Intensity Factor(MPa · m^{1/2})

τ_{xy} : Shear Stress(MPa)

σ_{yy} : Normal Stress(MPa)

1. 서 론

구조접착접합 이음은 전통적인 용접 접합의 관점에서 보면 여러가지 장점을 들 수 있다. 특히, 점용접 등에 비해 고른 응력분포와 상당한 접착 강도를 확인할 수 있기 때문에, 우주선, 자동차, 철도차량, 건축, 전자산업 등 응력완화 및 경량화, 고강도, 고강성을 필요로 하는 구조물의 접합에 그 활용이 늘어나고 있다⁽¹⁾⁽²⁾.

구조접착 부위에 대한 응력해석으로는 재료역

학, 탄성론에 기초한 이론해석과 유한요소법, 경계요소법 등을 이용한 수치해석법, 그리고 비파괴적인 방법으로 주파수 해석에 의한 방법 등이 있다.

Volkersen⁽³⁾은 1938년 최초로 접착이음의 응력 해석을 실시하였으며, 그 후 1944년 접착단부에서 발생하는 굽힘모멘트까지 고려한 FEM 해석이 Goland⁽⁴⁾ 등에 의해 수행되었고, BEM에 의한 단순접치기 이음을 중심으로 Yi⁽⁵⁾ 등에 의한 연구가 수행된 바 있다.

또한, 비파괴적인 해석방법 중 펄스-에코 송신 기술은 이음의 결함을 검출하기 위해 적용되고 있다. 이러한 기술은 단지 결함의 유무만을 검출할 수 있으나, 펄스-에코의 파형을 분리하여 응력과의 상관관계를 해석하려는 연구가 Benson⁽⁶⁾ 등에 의해 시도되었으며, 일부 연구자들에 의해 재료의 기계적 성질과 신호 해석과의 연관성을 적용한 바 있다⁽⁷⁾.

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통하여 사

* 숭실대학교 기계공학과 대학원

** 숭실대학교 기계공학과

용환경에 따라 접착이음의 접합강도에 미치는 파라미터의 관계를 규명하기 위해, A1 5052-T6 단순접치기 접착시험편의 인장·전단강도 시험을 통하여, 접착강도, 음속변화, 전압의 변화 등을 비교하고, 파괴역학 파라미터인 응력세기계수와와의 상관관계를 분석하였다.

2. 원리

2.1 접착접합 이음 구조 및 결함의 종류

단순접치기 이음에서 발생할 수 있는 결함의 전형적인 형태는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, 크게 3가지 타입으로 분류할 수 있다.

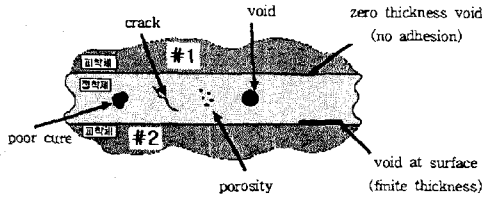


Fig. 1 Classification for defects of Adhesively-Bonded Joint

첫째, poor adhesion, 즉 피착체와 접착제 사이의 약한 결합을 말하며, 대체로 접착 표면층이 접착에 품질적으로 문제가 있는 표층부의 영향을 받는다. 둘째, poor cohesive strength, 즉, 접착시 불완전한 혼합 및 불충분한 경화에 의해 발생하는 강도를 말한다. 셋째, 복합 가공, 미접합, 미소 가공과 같은 비파괴적으로 검출할 수 있는 기본형태의 결함으로서 공기나 휘발성분이 접착시에 혼입되어 발생되거나, 접착시 불규칙적인 열적 수축등에 의한 경화가 형성되어 결함의 원인이 된다.

Fig. 2는 단순접치기 접착 이음에서의 A-scan에 의한 파형을 보여주고 있다. 만약 피착체 사이의 미접착 영역이 존재한다면, Fig. 1의 하단 피착체(#2) 저면으로부터의 반사는 더 이상 나타나지 않고, 상단피착체(#1)의 파형만 나타난다.

2.2 관련 이론

2.2.1 초음파 파형 해석법

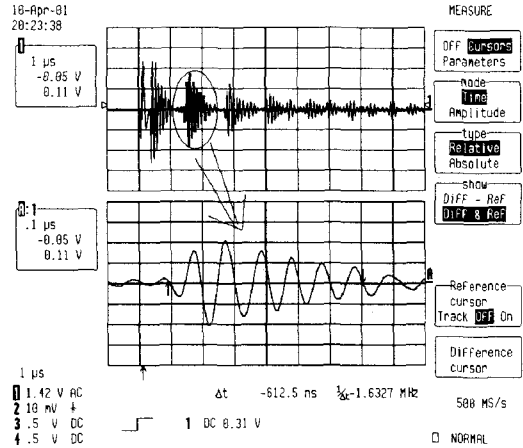


Fig. 2 A-scan of Single Lap Adhesive Joints

수학적 의미에서 신호처리란 시간영역에서 신호진폭의 변화와 주파수영역에서 얼마나 자주 진폭이 변화하는지에 관한 주파수의 함수로 나눌 수 있다. 시간과 주파수간의 가교적 역할을 하는 것이 푸리에 변환이며, 광범위한 분야에서 사용되고 있지만 시간영역과 주파수영역의 신호를 동시에 해석할 수 없기 때문에, 이의 적용에는 한계가 있다. 그러나, 시간-주파수 분석법을 적용하면 파형데이터를 시간과 주파수의 2차원 평면상에 분해하여 파형의 에너지밀도를 구할 수 있기 때문에 변동응력이 작용하는 재료의 정밀측정 분야에 적용이 가능하며⁽⁶⁾, 초음파신호의 데이터 해석에 시간-주파수 해석법을 적용하면 신호의 전파거동을 각 주파수 성분마다 분해할 수 있다.

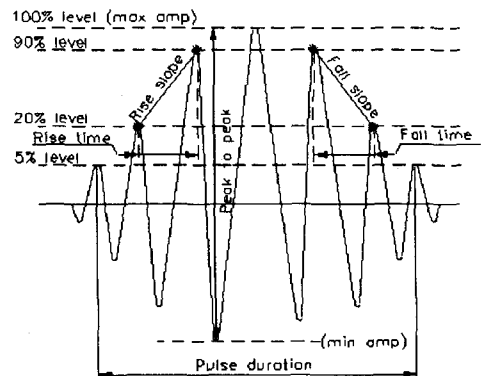


Fig. 3 Parameter of Waveform

파형의 매개변수로는 Fig. 3과 같이 Event, Energy, 진폭, 지속시간, 상승시간, 쇠퇴시간 등을 들 수 있다. 이들 파형 특징량의 측정방법으로, 주어진 파형에서 최대진폭이 되는 점의 주파수를 최대피크 주파수로 측정하며, 그 다음으로 최대진폭의 20%(14dB drop)를 낮춘 상태의 진폭 점에서 수평선으로 포락선에 그어 만나는 두 점을 만든다. 이때 만나는 두 점에서 주파수축으로 수직선을 내리면 두 교점이 생기고 첫 번째를 하한주파수(lower frequency: f_L), 두 번째를 상한주파수(upper frequency: f_U)로 구한다. 이때 이들 상하한 주파수의 합을 2로 나누어주면 중심주파수가 되며, 상하한주파수와 중심주파수를 이용하여 대역폭은 아래의 식으로 계산된다.

$$\text{Bandwidth} : B = \frac{f_U - f_L}{f_c} \times 100(\%) \quad (1)$$

또한, 파형의 에너지밀도는 아래와 같이 주파수 영역에서 파형의 면적을 뜻한다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \quad (2)$$

여기서 U는 시간 t_1 에서 t_2 까지의 에너지를 뜻하며, V는 시간 t 에 대한 파의 진폭을 말한다.

2.2.2 음속의 온도의존성

초음파의 음속은 온도의존성이 있기 때문에 음속측정시 시험편의 온도관리가 필요하다. 음속에 미치는 온도의 영향은 재료의 열팽창, 밀도변화 및 탄성계수의 변화 등을 통하여 나타난다. 이와 같이 음속의 온도의존성은 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 음속측정시에는 시료온도가 균일하게 되도록 온도관리를 하고 음속의 온도보정을 해야한다.

열응력은 이중재료가 접합된 경우 계면에서의 변형률차이에 의해 잔류응력 발생의 원인이 된다. 일반적으로 잔류응력 σ_{ij} 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma_{ij} \propto ((1 + \nu_1)\alpha_1 - (1 + \nu_2)\alpha_2) \Delta T = \mu_1 C_a \Delta T \quad (3)$$

여기서 ν 는 푸와송비, α 는 선팽창계수, ΔT 는 기준상태에 대한 온도차, μ_1 은 재료1의 전단탄성계수, C_a 는 열팽창계수를 말한다.

2.2.3 응력세기계수의 해석

열탄성해석에 대해 경계상의 경계조건을 다음과 같이 가정할 수 있다. 재료중의 변위를 u_i^1, u_i^2 , 표면력을 t_i^1, t_i^2 라 한다면,

(1) 완전접합부

$$u_i^1 = u_i^2, \quad t_i^1 + t_i^2 = 0 \quad (i = x, y) \quad (4)$$

(2) 개구된 균열부

$$t_i^1 = t_i^2 = 0 \quad (i = x, y) \quad (5)$$

(3) 불완전접합부

$$u_y^1 = u_y^2, \quad u_x^1 \neq u_x^2, \quad t_y^1 + t_y^2 = 0, \quad t_x^1 = t_x^2 = 0 \quad (6)$$

계면균열의 응력세기계수 K_i 는 균열선단근방의 응력장에 대한 파라미터가 되며, 균열진전력을 평가한다. 계면균열모델에서 응력세기계수는 다음과 같이 모드 I 과 모드 II의 복소 응력세기계수로써 표시된다⁽⁹⁾.

$$K_i = K_I + iK_2 \quad (7)$$

본 연구에서 적용된 응력세기계수는 Yuuki⁽¹⁰⁾가 제안한 이중재료 계면균열의 응력세기계수를 외삽에 의하여 결정하는 방법을 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$K_i = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r (\sigma_{yy}^2 + \tau_{xy}^2)} \quad (8)$$

각 균열길이에 대한 경계요소 응력해석 결과를 이용하여 위 식으로부터 응력세기계수를 계산할 수 있으며, 여기서 구한 응력해석 결과와 인장응력시 변동되는 초음파 파형의 변화에 대한 각각의 매개변수들을 상호 비교·분석하였다.

3. 초음파 실험

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 종파 탐촉자(krautkrämer사의 주파수 10MHz, 진동자 크기 : 10mm), 접촉매질(글리세린) 등이다. 실험에 있어서는 주파수와 열적변형을 고려한 시험편에 가해지는 인장·전단강도와 상관 관계를 고려하여 오실로스코프의 CRT상에 나타나는 결합 신호의 특징을 파악하였다. 실험장치는 Fig. 4와 같이 설정하였고, Table 1과 같은 조건으로 얻어진 데이터를 획득하여 오실로스코프로부터 파형변화의 관계를 확인하였으며, 시험편과 접착제의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Specimen Adhesive and Test Requirement

접착제	경화온도 (°C)	경화시간 (Hr)	인장속도 (mm/min.)	접착면적 (mm ²)
Cemedian 1500	20	2	0.1	25×25
	80			
	120			

Table 2 Mechanics Properties of Specimen

	E(GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
Al 5052	65.47	0.34	168.9	224.8
Cemedine1500	1.16	0.39	18.5	37.6

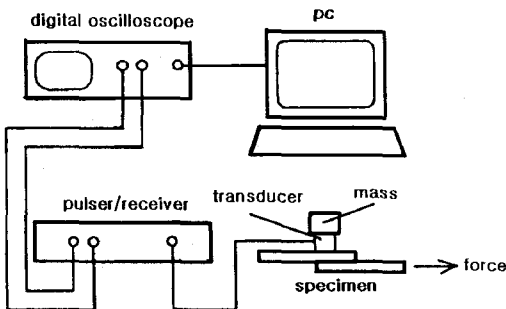


Fig. 4 Test Establishment

3.2 실험 방법

3.2.1. 접착 시험편

접착이음에 있어서 피착체 표면 조건은 접착강도에 매우 중요한 요소이다. 따라서, 피착체는 에머리페이퍼로 순차적으로 표면 가공을 실시하였으며, 아세톤으로 최종 세정작업을 하였다. 이어서, Al5052-T6를 두께 4mm(제1피착체), 2mm(제2피착체), 접착면적을 25mm×25mm로 하여 Cemedine 1500으로 접착을 실시한 후, 전기로에서 각각 20°C, 80°C, 120°C로 2시간정도 온도를 유지 후 노냉하였다.

인장전단 시험은 만능인장 시험기를 사용하여 속도비 0.1 m/min.로 실시하였다.

3.2.2. 단순겹치기 접착이음에서의 초음파 주파수 해석

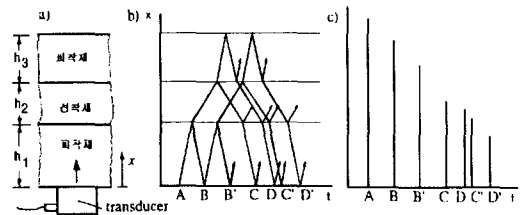


Fig. 5 Signal Analysis Classification of Adhesive Joints

Fig. 5는 초음파 트랜스듀서로부터 발생된 신호의 진행 및 크기를 말한다. 초음파 트랜스듀서로부터 발생된 펄스는 Fig. 5(b)와 같이 두 계면사이에서 반사파와 투과파로 분해되며, 그 크기는 Fig. 5(c)와 같다. Fig. 6은 수신된 펄스신호를 나타내고 있다. 그림에서 주파수파형의 획득은 제1 피착체에서 반사된 주파수성분(B)와 제2 피착체에서 반사된 주파수성분(D)를 선택하였다.

3.2.3 단순겹치기 접착이음에서의 초음파신호 실험에 의한 신호 취득은 1 point 당 2ns의 간격으로 샘플링하였다. 단순겹치기 접착이음에서의 결합에 대하여 초음파를 이용하여 획득한 신호는 오실로스코프상에 시간 영역상의 파형으로 나타낼 수 있으며, 이러한 파형은 주파수 영역상의

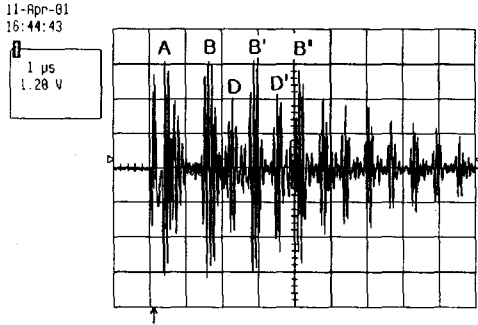


Fig. 6 Waveform Classification of AI5052-T6 Adhesive Area

특성을 갖게 된다. 본 연구에서는 열변형 온도에 따른 접착이음에 대한 결함에 대하여, 시간 영역상의 특징 추출에 있어서 획득한 전체 결함 신호를 기준으로 잡음 수준(noise level)을 고려하여 14dB Drop에 의한 음압의 20%를 기준으로 문턱값을 설정하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 인장·전단 하중을 부가한 시험편에서의 파형변화

인장·전단 하중을 부가한 후 변화된 파형변화는 Fig. 7~9와 같다. Fig. 7은 하중부하전의 파형이며, 그림에서와 같이 파형은 제1 피착체(두께 4mm)를 반사한 파형이 첫 번째 에코를 형성하고, 4mm와 2mm를 모두 투과한 반사파형이 두 번째 파형을 형성하고 있다. 여기에서는 계면에서의 접착제 두께에 대한 반사파형은 미소하므로

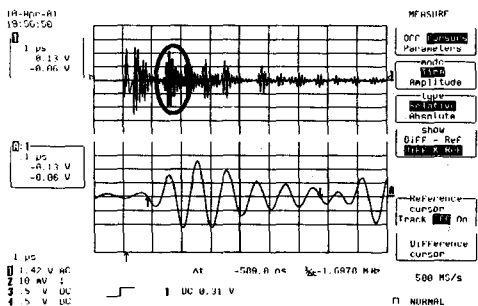


Fig. 7 Change of Waveform by Tension/Shear Strength : Pre-Load

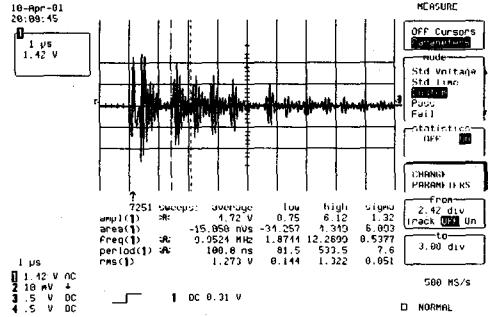


Fig. 8 Change of Waveform by Tension/Shear Strength : Post-Load

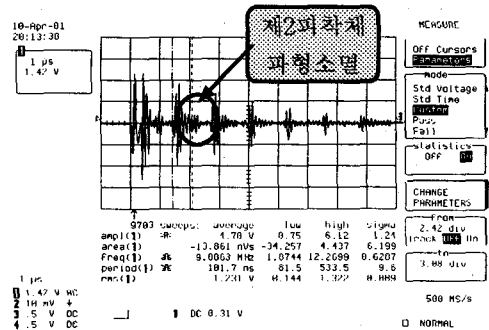


Fig. 9 Change of Waveform by Tension/Shear Strength : Fracture Waveform

검출은 어렵다.

Fig. 8은 하중부하에 따른 파형의 변화를 보여 주고 있다. 그림에서와 같이, 재료에 인장하중 부하시 초음파에 의한 파형은 인장응력의 증가에 따라 변화되고 있음을 나타내고 있다.

본 실험에서는 파라미터를 Amplitude(V), 음속(ns), 교류전류의 순시치인 RMS(V)와 파형의 내부에너지 밀도(nsV)를 설정하였다.

Fig. 9는 시험편의 파단 파형을 나타내고 있으며, 시험편두께 4mm(제1피착체), 2mm(제2피착체)를 접착후 초음파 탐상시 그림과 같이 계면에서의 제2피착체에 대한 파형은 나타나지 않고 있다. 그 이유는 인장/전단 하중이 증가시 계면에서의 균열이 발생하여 두 피착체가 박리되어 제2피착체에서의 반사파형이 소멸됨을 알 수 있다. 즉, 본 논문에서는 균열길이가 약 2mm이하에서 파단이 일어났으며, 파단 직전에 제2피착체의 파형이 소멸되어 사라짐을 확인하였다.

4.2 파형 파라미터와 응력세기계수와와의 상호 관계 비교

접착접합 계면에 대한 응력변화를 파악하는 것은 곧 그 재료의 수명을 파악할 수 있는 척도가 된다.

본 논문에서는 파괴역학 파라미터인 응력세기계수와 초음파 파형해석에 의한 상관관계를 확인하였다.

Fig. 10은 제1피착체에 대한 Amplitude의 변화를 나타내고 있다. 실험에서는 제1 피착체에 대한 인장·전단하중 부하시 Amplitude의 변화는 크게 나타나지 않고 있다. 다만, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 박리에 의한 계면의 분리가 지속될수록 제2 피착체의 Amplitude는 급격하게 감소함을 확인하였다. Fig. 11은 응력세기계수와 음속과의 관계를 나타내고 있으며, 음속이 인장·전단하중 부하에 따라 어느 정도 증가하나 그 변화는 크지 않다. Fig. 12는 응력세기계수와 RMS와의 관계를 나타내고 있으며, RMS에 대한 변화는 크지 않고 거의 일정함을 나타내고 있다. Fig. 13에서는 주파수 파형의 에너지밀도에 대한 응력세기계수의 상관관계를 나타내고 있으며 특히, 하중부하 초기에 급격한 에너지밀도 상승을 볼 수 있고 이후에는 양호한 선형관계를 유지함을 알 수 있기 때문에, 파형해석을 이용한 접착계면의 파괴양상을 파악하는데 유용한 파라미터라 생각되며, 이를 통해, 균열의 예측 및 파괴시점을 추정할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통하여 사용환경에 따라 접착이음의 접합강도에 미치는 매개변수의 관계를 규명하기 위해, Al 5051-T6 단순겹치기 접착시험편의 인장·전단강도 시험을 통하여, 초음파 파형 파라미터와의 상관관계를 다음과 같이 확인할 수 있었다.

(1) 인장·전단 하중의 증가에 따른 파형의 Amplitude는 탐촉자를 부착한 제 1피착체에서 미소한 변화를 보이나, 제 2피착체에 대한

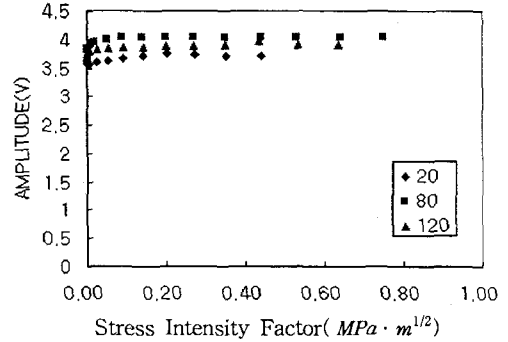


Fig. 10 Relation of Amplitude and SIF

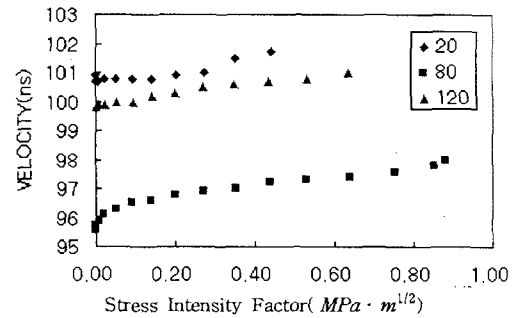


Fig. 11 Relation of Velocity and SIF

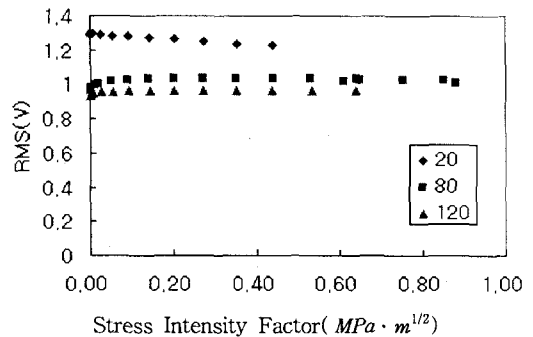


Fig. 12 Relation of RMS and SIF

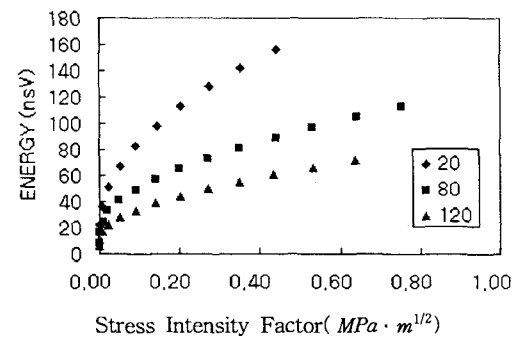


Fig. 13 Relation of Energy Density and SIF

Amplitude는 급격한 감소를 나타내고 있다. 이는 인장·전단 하중의 증가에 따라 피착체 끝단에서 전단과 인장굽힘에 의한 박리발생과 균열의 전파로 인한 계면단의 균열진전현상에 따른 초음파의 감쇄현상으로 파악할 수 있다.

(2) 음속변화법으로써 14dB Drop법으로 설정한 첫 번째 피착제 반사파의 음속변화는 하중 작용시 약간의 증가현상이 있으나, 인장·전단 하중부하시 접착제의 파단강도가 피착제의 파단강도보다 훨씬 적음에 따라 피착체에서의 두께 변화보다는 접착층에서의 변화가 훨씬 크므로 피착체 자체의 음속변화는 크지 않음을 알 수 있다.

(3) 초음파 파형의 에너지밀도로부터 인장·전단 강도가 증가함에 따라 응력세기계수 값의 초기에 급격한 에너지밀도 상승을 볼 수 있는데 이 구역을 응력세기계수의 하한계로 볼 수 있고, 그 이후는 선형적으로 증가하며 이는 인장-변형을 실험에서도 파단까지 탄성변형이 진행되는 것을 확인하였다.

(4) 온도가 다른 세 종류의 접착시험편에 대한 인장·전단강도는 온도가 80℃, 120℃, 20℃의 순서로 파단강도가 작아지며, 초음파실험에 의해서도 Amplitude와 음속의 크기가 파단강도와 같은 순서로 일치함을 확인하였다. 결국 접착접합체에 대한 각기 다른 온도변화를 주었을 때 각각의 피착체 계면에서는 열응력에 의한 접착제와 피착체 사이의 열변형에 따른 접착강도가 차이가 나는 것으로 해석할 수 있다.

이와 같이, 응력세기계수와 초음파 파형의 파라미터를 비교함으로써 초음파 파형의 변화로부터 접착강도를 해석할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

(1) Mori T., 1991, "A Review of Recent Advance in Stress Analysis and Strength Evaluation of Adhesive Joints," Structural Adhesive Technology for Advanced Needs-Its Foundation and Application to Automotive Body Society of Automotive Engineers of Japan, pp.64~79.

(2) Asai W., 1989, "Status of Adhesive Bonding Technologies for Aircrafts," Journal of

the Adhesive Society of Japan, Vol.25, No.10, pp.474~477.

(3) Volkersen O., 1938, "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten," Luftfahrtforschung, Vol.15, pp.41~47.

(4) Goland M., Reissner E., 1944, "The Stresses in Cemented Joints," J. Appl. Mech., pp.A-17~A-27.

(5) 이원, 정남용, 정의섭, 유영철, 1997, "경계요소법을 이용한 이종재료 접착접합체의 응력 및 응력세기계수 해석," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제9호, pp.1357~1363.

(6) Benson R. W., Raelson V. J., 1959, "Acousto-elasticity" Product Engineering, pp.56~59.

(7) Dickstein P., Spelt J., Sinclair A., 1991, "Application of higher order crossing feature to non-destructive evaluation : a sample demonstration of sensitivity to the condition of adhesive joints," Ultrasonics, pp.355~365.

(8) Crecraft D. I., 1967, "The Measurement of Applied and Residual Stresses in Metals using Ultrasonic Waves," J. Sound and Vibration, 5, pp.173~192.

(9) Kelly P., Nowell D., Hills D. A., 1994, "The Edge Interface Crack," Int. J. Fract., Vol.67, pp.263~271.

(10) Yuuki R., Cho S. B., 1989, "Efficient Boundary Element Analysis of Stress Intensity Factors for Interface Cracks in Dissimilar Materials," Engng. Fract. Mech., Vol.34, No.1, pp.179~188.