

초음파신호해석을 이용한 단순겹치기 접착이음의 강도평가

오승규* · 장철섭** · 한준영*** · 이 원****

*현대모비스 안전시스템부

**서울정보기능대 산업설비자동화과

***인천기능대 산업설비자동화과

****승실대학교 기계공학과

Strength Evaluation of Adhesively Bonded Single-Lap Joints by Ultrasonic Signal Analysis

Seung-Kyu Oh*, Chul-Sub Jang**, Jun-Young Han*** and Won Lee****

*Safety System R&D Dept. Hyundai Mobis, Yongin 449-910, Korea

**Dept. of Industrial Installation, Seoul Information Polytechnic College, Seoul 157-015, Korea

***Dept. of Automation of Industrial Installation, Incheon Polytechnic College, Incheon 403-719, Korea

****Dept. of Mechanical Engineering, SoongSil University, Seoul 156-743, Korea

Abstract

Application of bonding by adhesives can be found in many industries, particularly in advanced technological domains such as aeronautical and space, automobile and electronics industries. Periodic inspection with conventional ultrasonic NDE techniques is capable of indicating the presence and possible location of crack. Continuous ultrasonic attenuation monitoring has potential to supply information. This article discusses the use of pulse-echo ultrasonic testing for the inspection of adhesive bonds between metal sheets. The method is based on the measurement of the reflection coefficient at the metal/adhesive interface. By means of a control experiment it is shown that Quantitative Nondestructive Evaluation in Adhesive Joints are evaluated together with Ultrasonic Testing and Fracture Testing.

* Corresponding author ; seungkyu@mobis.co.kr

(Received June 21, 2004)

Key Words : Adhesively bonded single-lap joints, Non-destructive evaluation, Ultrasonic wave, Strength evaluation, Signal processing method

1. 서 론

기계구조물 및 기계요소의 결합에 있어서 용접이나 리벳이음과 같은 기계적인 체결법이 오래 전부터 널리 쓰여 왔지만, 최근 항공기, 자동차 원자력 기기, 전자 디바이스 등의 분야에서 경량화, 고강도, 설계의 유연성, 비용절감 등을 동시에 만족시킬 수 있는 접착접합 기술이 활발하게 적용되고 있다. 접착접합법은 볼트, 리벳 등에 의한 기계적 체결법에 비해 경량화, 응력집중의 감소, 진동 감소, 실링 효과 등의 우수한 특징으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 구조접합

제의 발달에 따라 과거 하중의 부담 및 파손에 따른 위험성이 적은 2차 보조부재에 주로 사용하던 접착접합법을 1차 주부재에 적용하려는 노력이 이루어지고 있으며, 복합재료, 세라믹 등과 같은 신소재의 접합법으로도 주목되고 있다. 이러한 접착접합부의 건전성에 대하여 초음파를 이용하여 평가하기 위한 많은 연구가 수행되어 오고 있다^{2,5)}. 초음파를 이용한 접착접합부의 강도 평가에 있어서는 아직까지도 정량적인 평가가 부족한 실정이다. 본 논문에서는 인장하중을 받고 있는 접착접합부의 강도를 비파괴평가(NDE ; nondestructive evaluation)할 수 있는 방법을 찾고자 하였다.

2. 관련 이론

2.1 접착점합부의 결함

접착점합부에서 발생할 수 있는 결함은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

- (1) 접착 불량(poor adhesion), 즉 접착제와 피착제 사이의 약한 결합(weak bond)
- (2) 응집력 불량(poor cohesive strength), 즉, 약한 접착제 층
- (3) 기공, 미접착
- (4) 크랙(crack)

접착 불량은 알루미늄이나 강판과 같은 재료의 표면에 가공 후 제거되지 못한 미세한 입자가 있거나 표면 처리에 의해 영향을 받는다. 접착 불량은 대단히 얇은 층(보통 10 μ m이하)을 포함하는 경계면 현상이므로 비파괴적으로 측정하기가 어렵다. 그러므로 이러한 측면의 품질관리는 여러 방법 중에서, 현재 접합 전에 피접착제의 표면 상태를 검사하는 방법으로 국한된다.

응집력 불량은 불완전한 혼합, 부정확한 배합이나 불충분한 접착제 경화에 기인한다. 접착강도와는 달리 접착제의 응집력은 다수의 비파괴적 방법으로 비교적 신뢰성 있게 평가할 수 있다.

기공, 미접착은 가장 단순한 형태의 결함이며 접합부를 대상으로 한 대부분의 비파괴 검사가 이들 결함 탐지를 목적으로 하고 있다. 미접착(disbonds 또는 zero-volume unbonds)은 제작과정에서 그리스와 같은 오염물질이 피착제에 부착되어 발생한다. 미접착부의 표면은 근접하거나 거의 접촉하지만 피착제로부터 접착제로 하중이 전달하지 못한다. 제작 후에 충격이나 접착제와 접착제-피착제 접합층의 환경에 의한 저하로 인하여 미접착이 발생할 수도 있다⁶⁾.

접착점합부에 하중을 가하면 접착층은 접착점합 계면에서 크랙(crack)이 발생하게 된다. 특히 접착점합 코너부에서 응력 집중이 발생하게 되어 이 부위에 크랙이 발생하기 쉽고 전파하는 속도가 빠르기 때문에 이를 탐지하여 강도와와의 관계를 파악할 필요가 있다⁷⁾.

2.2 접착이음의 강도평가

응력-변형률 곡선에서 곡선의 아래 부분의 면적을 계산하여 재료가 흡수한 에너지를 구할 수 있다. 이를 변형에너지밀도(strain energy density), U로 정의하고 다음 식으로 구할 수 있다.

$$U = \int \tau d\gamma \tag{1}$$

τ 는 전단강도, γ 는 전단변형률을 나타낸다. 만약 재료가 완전선형탄성이면, 응력-변형률 곡선은 직선이 된다. 최대변형에너지밀도는 재료의 접착강도 평가에 매우 중요한 판단 기준이 된다. 접착점합에 있어서 접합강도는 역학적인 에너지를 최대한 많이 흡수해야 한다. 최대 변형에너지밀도는 얼마나 많이 역학적인 에너지를 흡수할 수 있는가를 나타내는 파라미터이며, 접착점합에서 최대 변형에너지밀도로 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 강도를 구해야한다⁸⁾.

2.3 신호처리기법

초음파 비파괴 검사법은 높은 감도와 취급이 용이함으로 재료 결함 탐상에 많이 사용되는 방법이다.

일반적으로 비파괴적 평가방법으로는 결함의 탐상에 초음파를 이용한 감쇠계수 파라미터를 이용한다. 감쇠계수는 결합에서 반사되는 감쇠인자 크기에 의해 결정된다. 최근에는 이러한 파형의 변화를 푸리에해석법(Fourier analysis method)⁹⁾를 이용하여 신호의 해석을 정량적으로 평가하려는 연구가 있다.

2.3.1 신호의 정량화

신호의 정량화를 위해 표현되는 방법은 Fig. 1과 같이 정현파의 진동진폭을 나타내는 방법으로 피크-피크값(peak-to-peak), 최대값(peak), 평균값(average), RMS값 등이 있다. 피크-피크값은 파의 최대변화를 나타내기엔 편리하다. 예를 들면, 기계부속이 최대응력 혹은 기계공차 측면에서 진동변위가 중요시될 때 사용된다. 최대값은 짧은 시간의 충격 등이 크기를 나타내기엔 특히 유용하다. 그러나, 그림에서 처럼 이값은 단지 최대값만을 표시할 뿐이며, 시간에 대한 변화량은 나타나지 않는다. 평균값은 파의 시간에 대한 변화량을 표시하지만 어떤 유용한 물리적 양과는 직접 관련이 없기에 실제적으로 사용범위가 국한되어 있다. RMS값은

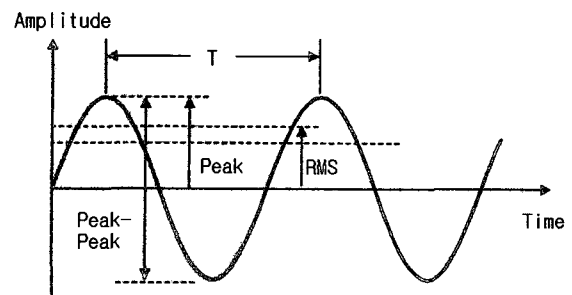


Fig. 1 Time signal descriptors

시간에 대한 변화량을 고려하고, 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로 진동크기의 표현에 가장 적절하다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (2)$$

또한, amplitude-time 그래프를 이용하여 RMS 상승의 power-frequency의 진폭스케일링 그래프로 전환된 함수로써 신호의 강도를 표현한다.

2.3.2 푸리에해석법에 의한 신호의 처리

Fig. 2에서 W_1 은 표면반사 신호이고, 시편 #1에 입사한 신호 W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = f(wt - kx) \quad (3)$$

w 는 각주파수, k 는 파수이다. 접착층에서 반사한 신호(W_2)와 시편#2의 저면에서 반사한 신호(W_3)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_2 &= T_{AC} R_{CA} T_{CA} f(wt - 2k_{AA} - 2k_{Cb}) \\ W_3 &= T_{AC}^2 T_{CA}^2 f(wt - 2k_{AA} - 2k_{Cb} - 2k_{AC}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 a, b, c 는 시편#1, 접착층, 시편#2의 두께이다. 아래첨자 A 와 C 는 각각 Al6061-T6과 Cemedine 1500을 나타낸다.

R_{ij} 는 j 매체에서 i 매체로 반사되는 반사계수, T_{ij} 는 i 매체에서 j 매체로 투과되는 투과계수로서 다음과 같다¹⁰⁾.

$$R_{ij} = \frac{\rho_i c_i - \rho_j c_j}{\rho_i c_i + \rho_j c_j} = -R_{ji},$$

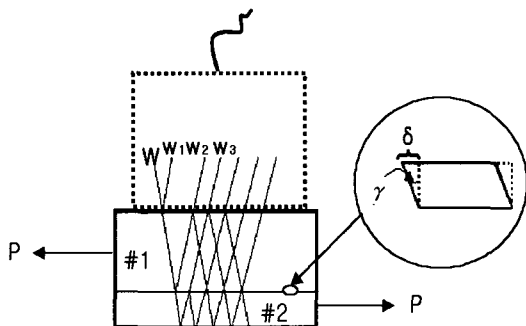


Fig. 2 Ultrasonic wave propagation to the adhesively single-lap joints

$$T_{ij} = \frac{2\rho_i c_i}{\rho_i c_i + \rho_j c_j} = 2 - T_{ji} \quad (5)$$

임의의 함수 $f(t)$ 의 푸리에 변환 $F(f)$ 와 역 푸리에 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad -\infty < f < \infty \quad (6)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (7)$$

신호 W_2 와 W_3 를 각각 $f(t), g(t)$ 라하고 푸리에 변환하면,

$$\begin{aligned} f(t) &= T_{AC} R_{CA} T_{CA} f(wt - 2k_{AA} - 2k_{Cb}) \\ g(t) &= T_{AC}^2 T_{CA}^2 f(wt - 2k_{AA} - 2k_{Cb} - 2k_{AC}) \\ F(f) &= T_{AC} R_{CA} T_{CA} e^{-i2k_{AA}a} e^{-i2k_{Cb}b} F_0(f) \\ G(f) &= T_{AC}^2 T_{CA}^2 e^{-i2k_{AA}a} e^{-i2k_{Cb}b} e^{-i2k_{AC}c} F_0(f) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $F_0(f)$ 는 f_0 함수의 푸리에 변환이다.

3. 실험

3.1 시험편

접착이음의 피착재로서는 자동차 및 항공기용 구조재료로서 사용되고 있는 6061-T6을 사용하였고, 접착제로는 Cemedine 1500을 사용하였다.

Table 1은 실험에 의해 구한 각 재료의 기계적성질을 나타내었다. 탄성계수 (E)와 프와송비(ν)는 전단강도를 구하는데 이용하고, 초음파의 종파속도 (c)와

Table 1 Material property

Material Property	Al6061-T6	Cemedine1500
E (Young's modulus, GPa)	67.29	1.16
ν (Poisson's ratio, mm/mm)	0.37	0.39
c (longitudinal velocity, m/s)	6,154	2,840
ρ (Density, g/mm ³)	2.72	1.28

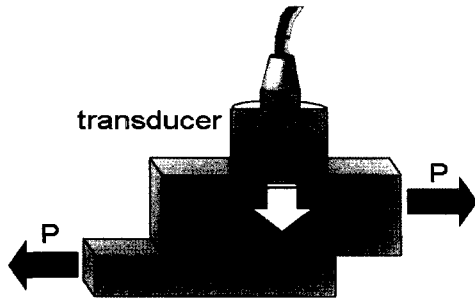


Fig. 3 Adhesively single lap-joints specimen

재료의 밀도(ρ)는 반사계수와 투과계수를 구하는데 이용하였다.

Fig. 3에 접착이음 시험편의 형상 및 초음파 탐상 위치를 나타내었다. 시험편은 알루미늄 판재를 치수에 따라 가공하고 표면을 #100 (mesh 100)의 사포(sandpaper)로 처리하고 아세톤으로 탈지·세정하였다. 판재의 압연방향과 시험편의 인장방향을 일치시키고, 접착폭과 접착면적을 각각 25mm로 하여 Al6061-T6와 Cemedine 1500을 접착접합하였다. 또한, 시험편을 각각 8mm×4mm, 12mm×6mm, 16mm×8mm로 세 종류의 두께로 실험을 실시하였다. 이렇게 제작된 시험편을 전기로 내에서 80℃로 4시간동안 경화시킨 후 상온까지 냉각하고, 완전경화 후 실험하였다.

3.2 실험방법

Fig. 4에서 보는 바와 같이 펄스-리시버(pulse-receiver)에서 주기적으로 보내는 펄스는 탐촉자에서 송신되고 인장하중을 받고 있는 시험편을 전파하고 돌아온 신호를 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)에서 처리하게 된다. 탐촉자는 일정 압력하에서 초음파를 송수신하기 위하여 초음파센서를 시험편 상단부에 지그를 이용하여 고정하였으며, 종파탐촉자(Panametrics사) 10MHz를 사용하여 하중과 변형에 대한 접착접합부의 신호를 검출하였다. 접착부에서 응력 집중이 발생

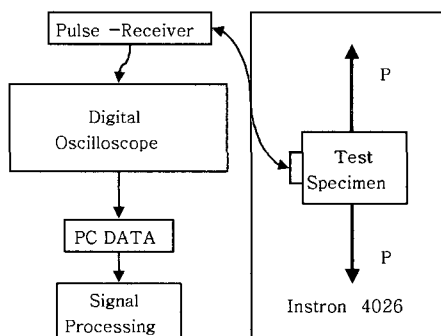


Fig. 4 Test model

하는 접착단 모서리부에 탐촉자를 위치시키고 고정장치를 이용하여 일정하중으로 시편에 압력을 가하였다. 인장실험에는 용량 150 kN의 만능 인장시험기(Instron model 4206)를 사용하였다. 크로스 헤드의 이동속도를 0.1mm/ min으로 하여 단순접합기 접착이음부재에 하중을 정적으로 가하였다. 변위와 하중을 측정하면서 접착접합부를 수직탐상하여 오실로스코프에 나타난 신호를 동시에 저장하였다. 저장된 신호는 시간-진폭(time-amplitude) 펄스접침법을 이용하여 Al6061-T6와 Cemedine 1500의 재질내 전파속도를 구하였다. 그리고 푸리에해석법에 의한 진폭 스펙트럼을 구하여 인장실험에 의해서 구한 전단강도와 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 하중을 가하기 전의 초음파탐상 신호이다. Fig. 5에서 A는 시편#1 (Al6061-T6, 8t)의 접착층에서 반사한 신호이고, B는 시편#2(Al6061-T6, 4t)의 저면에서의 반사 신호이다. 하중이 증가함에 따라 Fig. 5의 신호 B는 점차 감소하게 된다. Fig. 6은 신호 B를 나타낸 것이다. 이 신호의 변화는 초음파의 분산성에 의한 것으로서 하중 증가에 따른 접착층의 미소

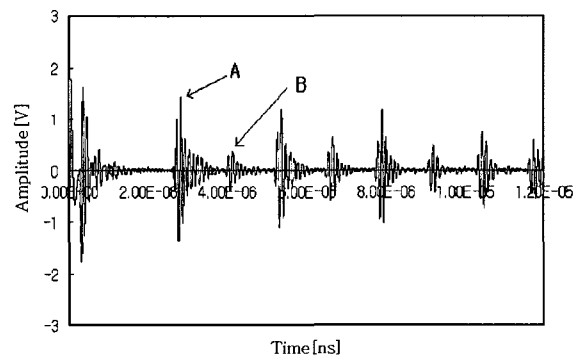


Fig. 5 Ultrasonic pulse echo of adhesively single-lap joints on unloading

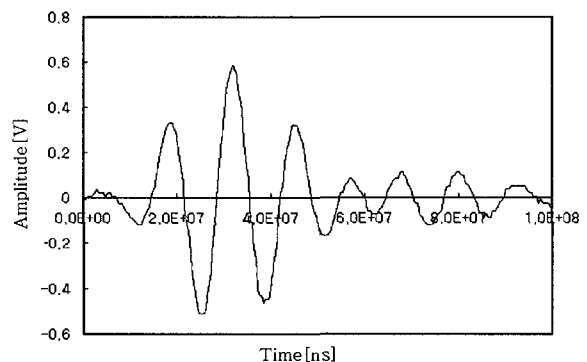


Fig. 6 Amplitude and time of material 'B' waveform in adhesively single-lap joints

크랙의 증가에 의해 발생한다. 단순접치기 접착이음에 인장하중을 가하면 접착층에서 전단변형이 일어나 접착층에 전위(displacement)가 발생하게 된다. 이러한 접착층의 전위에 의해 미세한 크랙들이 발생하고 접착층을 통과하던 초음파는 크랙 부위에서 분산하게 된다. 따라서 하중이 증가함에 따라 크랙이 전파하게 되고 초음파의 분산성은 증가하여 신호 B가 감소하게 된다.

Fig. 7은 세 종류의 시험편에 대하여 각각 전단하중에 대한 일반적인 초음파 감쇠계수에 의한 비교그래프이다. 그래프에서와 같이 시험편의 두께가 얇아지면서 감쇠계수가 커짐을 알 수 있다. 이것은 시험편의 두께가 두꺼워지면 재질내의 임피던스와 산란감쇠 등에 의한 영향이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 5에서 접착층에서 반사한 신호(A)와 시험#2의 저면에서 반사한 신호(B)를 각각 고속푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform)하면 Fig. 8과 같은 진폭스펙트럼을 구할 수 있으며, 주기적인 신호의 강도를 power-frequency의 함수로써 표현할 수 있다. Fig. 8은 세 종류의 시험 중 감쇠가 가장 큰 8mm×4mm 데이터를 이용하여 그래프화 하였다.

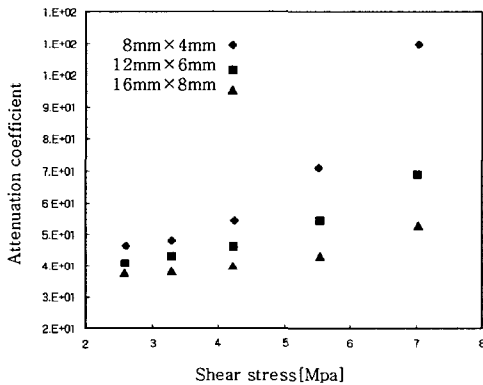


Fig. 7 Attenuation coefficient and shear stress of adhesively single-lap joints

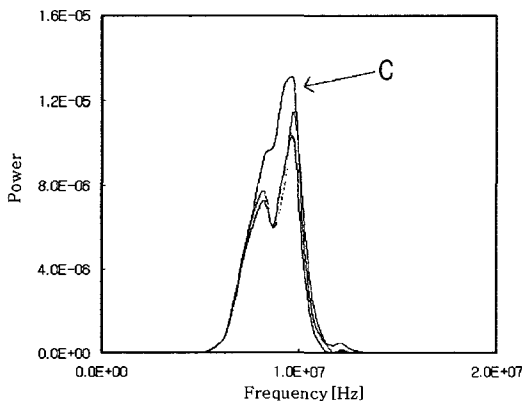


Fig. 8 Power and frequency of adhesively single-lap joints

여기서, Deterministic signals에서의 진폭 스케일링은 시간-음압의 함수를 주파수-파워의 함수로 표현할 수 있으며, Random signals은 주파수-파워스펙트럼밀도, 그리고, Transient signals은 주파수-에너지 스펙트럼밀도로 표현하여 각각의 신호를 효과적으로 분석할 수 있다.

그래프에서 두 재료의 수직방향으로 인장하중이 증가함에 따라 power-frequency 그래프는 파단직전(C부)에 크게 증가함을 볼 수 있었으며, 이것은 균열이 발생함에 따른 것으로 time-amplitude 그래프에서 표시부 B의 음압이 크게 떨어짐으로 균열이 발생함을 확인하였다. 또한, 그래프에서와 같이 인장하중 증가에 따른 중심주파수는 같았음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 기존의 여러 논문에서 부재에서 발생하는 하중에 대한 신호의 크기가 파단하중 직전에 크게 증가한다는 결과¹¹⁾와 같은 결과를 나타내고 있다. 그리고, 측정된 하중과 변형값에 의해 접착층의 전단강도를 계산하고 식 (1)을 이용하여 변형에너지밀도를 구하였다.

재료의 접착접합강도의 파괴적 파라미터인 변형에너지밀도와 이에 대한 초음파탐상에 의한 비파괴평가에 있어서 중요한 비파괴적 파라미터인 중심주파수-파워 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 변형에너지밀도가 증가함에 따라 일정 수준이상에서 급격한 파형의 강도가 증가함을 확인하였으며, 초음파 탐상의 결과, 이 지점에서의 계면에 대한 반사파가 소멸함을 확인하였다. Fig. 10은 변형에너지밀도와 비파괴인자로서 감쇠계수를 비교한 그래프이다. 그래프에서 변형에너지밀도가 증가함에 따라 감쇠계수도 상대적으로 증가함을 나타내고 있다. 따라서, Fig. 10은 상대적으로 응력에 따른 결함과 비례적인 함수로써 수명을 평가할 수 있으며, Fig. 9와 같이 최대변형에너지밀도(ultimate strain energy density)는 접착부재가 파단하기 직전의 수치

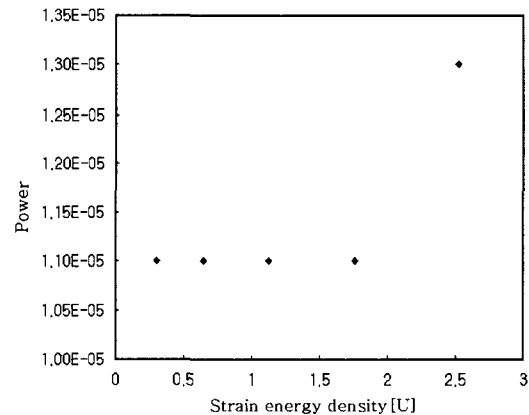


Fig. 9 Power and strain energy density of adhesively single-lap joints

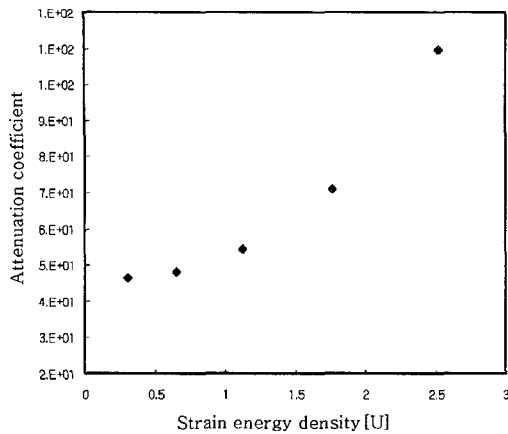


Fig. 10 Attenuation coefficient and strain energy density of adhesively single-lap joints

이므로 이에 대한 frequency-power의 특성값을 파악함으로써 인장하중을 받고 있는 접착접합부의 파단직전의 강도평가 인자로 활용할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서 단순접합기 접착이음에 대한 인장실험과 초음파탐상 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단순접합기 접착이음부의 접착층에 대한 변형에너지밀도와 이에 대한 접착접합부의 주파수 파워를 구한 결과 변형에너지밀도가 일정수준 증가 후 급격한 파워인자의 증가를 확인하였다.

(2) 변형에너지밀도가 최대가 되는 최대변형에너지밀도(ultimate strain energy density)는 접착부재가 파단하기 직전의 수치이므로 이에 대한 파형에너지를 인장하중을 받고 있는 접착접합부의 강도평가에 이용할 수 있음을 확인하였다.

(3) 접착접합 계면에 대한 변형에너지밀도는 감쇠계수와 서로 밀접한 비례관계를 가지고 있으며, 이를 통하여 계면단에서의 접합상태를 분석할 수 있었다.

(4) 파괴 파라미터인 변형에너지밀도와 비파괴 파라미터인 감쇠계수 및 주파수파워를 이용하여 접착접합부의 강도에 대한 상관관계를 확인하였다.

참 고 문 헌

1. K.L.Mittal, A.Pizzi : Adhesion Promotion Techniques, Marcel Dekker, 1999, 1-23
2. R.Kline, C.Hsiao, and M.Fidali : Non-destructive evaluation of adhesively bonded joints, Journal of Engineering Materials and Technology, **18** (1986), 214-217
3. K.H. David, and C.P. Thadd : Development of Ultrasonic Inspection for Adhesive Bonds in Aging Aircraft, Materials Evaluation, 1993, 1390-1397
4. Y.H.Kim, S.D.Kwon, S.J.Song, and M.H.Jung : Effects of Rubber Loading on the Ultrasonic Backward Radiation Profile of Leaky Lamb Wave, J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, **22-5** (2002), 508-515 (in Korean)
5. W.Yi, E.S.Jeong, Y.C.Yu : Structural adhesion technology in automobile, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, **19-4**, (1997), 14-23 (in Korean)
6. R.D.Adams, B.W.Drinkwater : Nondestructive testing of adhesively bonded joints, NDT&E International, **30-2** (1997), 93-98
7. Y.C.Yu, S.K.Oh, W.Yi : Stress analysis and strength evaluation of structural adhesive joints in automobiles-bond strength for adhesive-bonded aluminum alloy single-lap joints, Journal of the Korea mechanical engineers, **22-4** (1998), 905-915 (in Korean)
8. V.P. Alphonsus : Adhesion and Adhesives Technology, Hanser, New York, 1997, 1-19
9. Y.S.Jang, J.H.Kim, H.H.Jeong, and Y.H.Nam : Measurements of ultrasonic velocity and attenuation by signal processing techniques in time and frequency domains, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, **19-2** (1999), 118-128 (in Korean)
10. J.D.Achenbach : Wave propagation in elastic solids, Elsevier science, 1993, 26-28
11. O.Y.Kwon, J.L.Kyung : Assessment of Fatigue Damage of Adhesively Bonded Composite-Metal Joints by Acousto-Ultrasonics and Acoustic Emission, J. of the Korean society for nondestructive testing, **21-4** (2001), 425-433 (in Korean)