

신호처리기법을 이용한 단순접착기 접착이음의 비파괴적 강도평가

정일화* · 오승규* · 황영택* · 장철섭* · 정의섭** · 이 원***

Nondestructive Strength Evaluation of Adhesive-Bonded Single-Lap Joints by Signal Processing Method

Jeong-Ilhwa, O-SeungKyu, Hwang-YeongTaik, Jang-Chulseob, Jeong-Euiseob and Yi-Won

Key Words: Adhesive-Bonded Single-Lap Joints(단순접착기 접착이음), NDE(Non-Destructive Evaluation; 비파괴평가), Ultrasonic Wave(초음파), Strength Evaluation(강도평가), Signal Processing Method(신호처리기법)

Abstract

Application of bonding by adhesives can be found in many industries, particularly in advanced technological domains such as the aeronautical and space industries, automobile manufacture, and electronics. 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 study used adhesive-bonded single-lap joints specimen to evaluate such possibility by ultrasonic signal processing method.

기호설명

- τ : 전단응력 (shearing stress, MPa)
- U : 변형에너지밀도(strain energy density, J/m³)
- γ : 전단변형률(shearing strain, rad)
- R_{ij} : 반사계수(reflection coefficient, %)
- T_{ij} : 투과계수(transmission coefficient, %)
- α : 감쇠계수 (attenuation coefficient, dB/m)
- c : 종파속도(longitudinal velocity, m/s)
- ρ : 밀도(density, g/mm³)

1. 서론

기계구조물 및 기계요소의 결합에 있어서 용접이나 리벳이음과 같은 기계적인 체결법이 오래 전부터 널리 쓰여 왔지만, 최근 항공기, 자동차 원자력 기기, 전자디바이스 등의 분야에서 경량화, 고강도, 설계의 유연성, 비용절감 등을 동시에 만족시킬 수 있는 접착접합기술이 활발하게 적용되고 있다. 접착접합법은 볼트, 리벳 등에 의한 기계적 체결법에 비해 경량화, 응력집중의 감소, 진동 감쇠, 실링 효과 등의 우수한 특징으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾. 구조 접착제의 발달에 따라 과거 하중의 부담 및 파손에 따른 위험성이 적은 2차 보조부재에 주로 사용하던 접착접합법을 1차 주부재에 적용하려는 노력이 이루어지고 있으며, 복합재료, 세라믹스

* 회원, 숭실대 기계공학과 대학원

** 회원, 한국과학기술정보연구원

*** 회원, 숭실대 기계공학과

등과 같은 신소재의 접합법으로도 주목되고 있다. 이러한 접착접합부의 건전성을 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 정량적으로 비파괴 평가(NDE; non-destructive evaluation)할 수 있는 방법을 찾고자 한다.

2. 관련이론

2.1 접착접합부의 결함

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

- (1) 접착 불량 (poor adhesion), 즉 접착제와 피접착제 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 표면처리에 의해 영향을 받는다. 접착 불량은 대단히 얇은 층(보통 10 μm 이하)을 포함하는 경계면 현상이므로 비파괴적으로 측정하기가 어렵다. 그러므로 이러한 측면의 품질관리는 여러 방법 중에서, 현재 접합 전에 피접착제의 표면상태를 검사하는 방법으로 국한된다.

응집력 불량은 불안정한 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 검사기들이 결함 탐지를 목적으로 하고 있다. 미접착(disbonds 또는 zero-volume unbonds)은 제작과정에서 그리스와 같은 오염물질이 피착재에 부착되어 발생한다. 미접착부의 표면은 근접하거나

거의 접촉하지만 피착재로부터 접착제로 하중이 전달하지 못한다. 제작 후에 충격이나 접착제와 접착제-피착재 사이층의 환경에 의한 저하로 인하여 미접착이 발생할 수도 있다⁽⁶⁾.

접착접합부에 하중을 가하면 접착층은 접착접합계면에서 크랙(crack)이 발생하게 된다. 특히 접착접합 코너부에서 응력 집중이 발생하게 되어 이 부위에 크랙이 발생하기 쉽고 전파하는 속도가 빠르기 때문에 이를 탐지하여 강도와와의 관계를 파악할 필요가 있다⁽⁷⁾.

2.2 접착이음의 강도평가

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

$$U = \int \tau d\gamma \quad (1)$$

τ 는 전단강도, γ 는 전단변형률을 나타낸다. 만약 재료가 완전선형탄성이면, 응력-변형률 곡선은 직선이 된다. 그러므로 곡선 아래의 면적은 바로 삼각형의 면적이 된다. 최대변형에너지밀도는 재료의 접착강도 평가에 매우 중요한 판단 기준이 된다. 접착접합에 있어서 역학적인 에너지를 최대한 많이 흡수해야 한다. 최대 변형에너지밀도는 얼마나 많이 역학적인 에너지를 흡수할 수 있는가를 나타내는 파라미터이다. 접착접합에서 우리는 가능한 높은 최대 변형에너지밀도로 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 강도를 구해야 한다.⁽⁸⁾

2.3 신호처리기법

초음파 비파괴 검사법은 높은 감도와 취급이 용이함으로 재료 결함 탐상에 많이 사용되는 방법이다. 재료의 결정구조, 미세구조 특성 평가, 결함의 탐상 등에는 초음파에 의해 측정된 감쇠계수를 이용한다. 펄스검침법과 푸리에해석법(Fourier analysis method)⁽⁹⁾을 이용하여 신호를 처리하고 본 연구에서도 감쇠계수를 강도평가 파라미터로 사용하였다.

2.3.1 펄스겹침법(Pulse Overlap Method)

펄스겹침법은 두 신호 사이의 시간 지연을 구하는 방법으로서 다음과 같이 구해진다.

$$t = t_w + t_2 - t_1 \quad (2)$$

여기서 t_w 는 두 신호의 시간차이고, t_1 , t_2 는 Fig. 1의 $W_2 \sim W_3$ 내에서 시작점과 최대 진폭점까지의 시간이다. 시편의 두께를 d 라고 하면 속도는 다음 식으로 주어진다.

$$v = \frac{2d}{t} \quad (3)$$

2.3.2 푸리에해석법에 의한 신호의 처리

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

$$W = f(\omega t - kx) \quad (4)$$

ω 는 각주파수, k 는 파수이다. 펄스에코 방법이므로 해석 대상이 되는 접착층에서 반사한 신호(W_2)와 시편#2의 저면에서 반사한 신호(W_3)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_2 &= T_{AC} R_{CA} T_{CA} f(\omega t - 2k_{AA} - 2k_{Cb}) \\ W_3 &= T_{AC}^2 T_{CA}^2 f(\omega t - 2k_{AA} - 2k_{Cb} - 2k_{AC}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 a , b , c 는 시편#1, 접착층, 시편#2의 두께이다. 아래첨자 A 와 C 는 각각 Al6061-T6와 Cemedine 1500을 나타낸다.

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

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \frac{\rho_j c_i - \rho_i c_j}{\rho_j c_i + \rho_i c_j} = -R_{ji}, \\ T_{ij} &= \frac{2\rho_j c_i}{\rho_j c_i + \rho_i c_j} = 2 - T_{ji} \end{aligned} \quad (6)$$

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

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

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} f(t) &= T_{AC} R_{CA} T_{CA} f(\omega t - 2k_{AA} - 2k_{Cb}) \\ g(t) &= T_{AC}^2 T_{CA}^2 f(\omega t - 2k_{AA} - 2k_{Cb} - 2k_{AC}) \\ F(f) &= T_{AC} R_{CA} T_{CA} e^{-i2k_{AA}} e^{-i2k_{Cb}} F_0(f) \end{aligned} \quad (9)$$

$$G(f) = T_{AC}^2 T_{CA}^2 e^{-i2k_{AA}} e^{-i2k_{Cb}} e^{-i2k_{AC}} F_0(f) \quad (10)$$

이다. $F_0(f)$ 는 f_0 함수의 푸리에 변환이다. 식 (10)를 (9)로 나누면,

$$\frac{G(f)}{F(f)} = \frac{T_{AC} T_{CA}}{R_{CA}} e^{-i2k_{AC}} \quad (11)$$

이다. 복소수 파수 $k_A = k_1 + ik_2$ 를 (11)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} e^{-i2k_{AC}} &= e^{-i2c(k_1 + ik_2)} = e^{2k_2 c} e^{-i2k_1 c} \\ &= \frac{R_{CA}}{T_{AC} T_{CA}} \frac{G(f)}{F(f)} = M e^{i\phi} \\ k_1(f) &= -\phi/2c, \quad k_2(f) = \frac{\ln M}{2c} \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 여기서 $M = \left| \frac{R_{CA}}{T_{AC} T_{CA}} \frac{G(f)}{F(f)} \right|$ 은 진폭 스펙트럼이다.

감쇠계수 a 는 다음 식으로 주어진다.

$$\alpha(f) = \frac{\ln M}{2c} \quad (13)$$

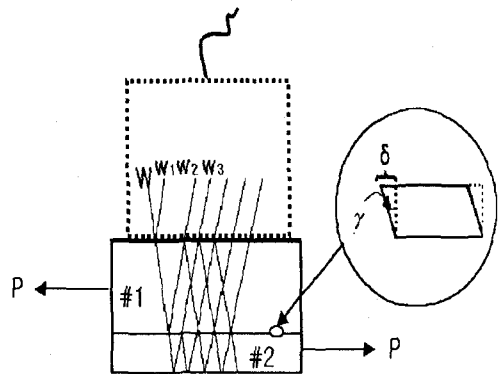


Fig. 1 Ultrasonic wave propagation to the adhesive single-lap joints.

3. 시험편 및 실험방법

3.1 시험편

접착이음의 피착재로서는 자동차 차체용 판재에 적절한 재질특성과 성형성 및 내식성을 갖고 있는 Al6061-T6을 사용하였고, 접착제로는 Cemedine 1500을 사용하였다.

Table. 1에 실험에 의해 구한 각 재료의 물성치를 나타내었다. 탄성계수(E)와 프와송비(ν)는 전단강도를 구하는데 이용하고, 초음파의 종파속도(c)와 재료의 밀도(ρ)는 반사계수와 투과계수를 구하는데 이용하였다.

Fig. 2에 접착이음 시험편의 형상, 치수 및 초음파탐상위치를 나타내었다. 시험편은 알루미늄 판재를 치수에 따라 가공하고 표면을 #100(mesh 100)의 사포(sandpaper)로 처리하고 아세톤으로 탈지·세정하였다. 판재의 압연방향과 시험편의 인장방향을 일치시키고, 접착면적을 25mm²로 하여 Al6061-T6와 Cemedine 1500을 접착접

Table. 1 Material property.

| Property \ Material | Al6061-T6 | Cemedine 1500 |
|--------------------------------------|-----------|---------------|
| E (Young's modulus, Gpa) | 67.29 | 1.16 |
| ν (Poisson's ratio, mm/mm) | 0.37 | 0.39 |
| c (longitudinal velocity, m/s) | 6154 | 4620 |
| ρ (Density, g/mm ³) | 2.72 | 1.07 |

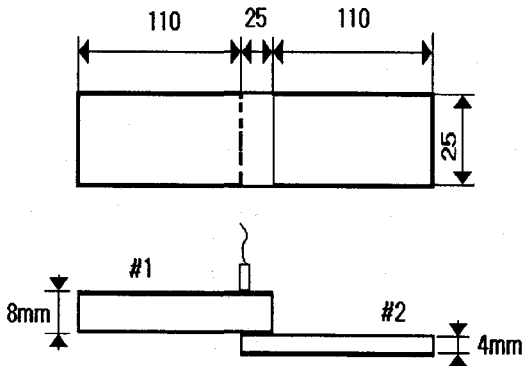


Fig. 2 Adhesive single lap-joints specimen.

합하였다. 이렇게 제작된 시험편을 전기로 내에서 80°C로 4시간동안 경화시킨 후 상온까지 냉각하고, 완전경화 후 실험하였다.

3.2 실험방법

Fig. 3에서 보는 바와 같이 펄서-리시버(pulsar-receiver)에서 주기적으로 보내어지는 펄스는 탐촉자에서 송신되고 인장하중을 받고 있는 시험편을 전파하고 돌아온 신호를 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)에서 처리하게 된다. 탐촉자는 종파탐촉자(Panametrics사) 10MHz를 사용하여 하중과 변형에 대한 접착접합부의 신호를 검출하였다. 접착부에서 응력 집중이 발생하는 접착단 모서리부에 탐촉자를 위치시키고 고정장치를 이용하여 일정하중으로 시험편에 압력을 가하였다.

인장실험에는 용량 150kN의 만능 인장시험기(Instron model 4206)을 사용하였다. 크로스 헤드의 이동속도를 0.1mm/min.으로 하여 단순접치기 접착이음부재에 하중을 정적으로 가하였다. 변위와 하중을 측정하면서 접착접합부를 수직탐상하여 오실로스코프에 나타난 신호를 동시에 저장하였다. 저장된 신호는 시간-진폭(time-amplitude) 펄스검침법을 이용하여 Al6061-T6와 Cemedine 1500의 재질내 전파속도를 구하였다. 그리고 푸리에해석법에 의해 진폭 스펙트럼을 구하여 감쇠계수를 구하고 인장실험에 의해 구한 전단강도와 비교하였다.

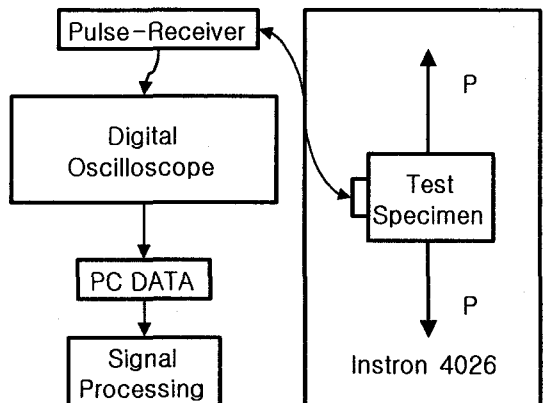


Fig. 3 Test model.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 하중을 가하기 전의 초음파탐상 신호이고, Fig. 5는 파단 직전의 신호이다. Fig. 4와 5에서 W_1 은 시편#1(AI6061-T6, 8t)의 표면에서 반사한 표면반사, W_2 는 접착층에서의 반사, W_3 은 시편#2(AI6061-T6, 4t)의 저면에서의 반사 신호이다. 하중이 증가함에 따라 Fig. 4의 신호 W_3 는 점차 감소하여 Fig. 5의 신호 W_3 로 감소하게 된다. 이 신호의 변화는 초음파의 분산성에 의한 것으로서 하중 증가에 따른 접착층의 미세크랙의 증가에 의해 발생한다. 단순접합기 접착이음에 인장하중을 가하면 접착층에서 전단변형이 일어

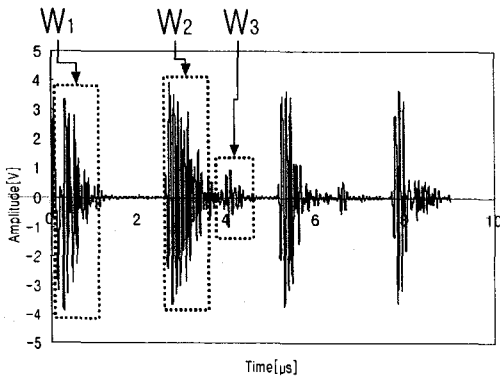


Fig. 4 Ultrasonic pulse echo of adhesive single-lap joints on unloading.

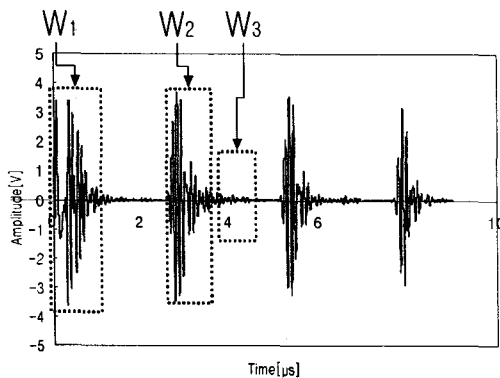


Fig. 5 Ultrasonic pulse echo of adhesive single-lap joints near by fracture.

나 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 W_3 가 감소하게 된다. 접착층에서 반사한 신호(W_2)와 시편#2의 저면에서 반사한 신호(W_3)를 각각 고속푸리에변환(FFT; Fast Fourier Transform)하면 Fig. 6과 같은 진폭 스펙트럼을 구할 수 있다. 고속푸리에변환을 이용하여 하중과 변형의 증가에 따른 각 신호의 진폭 스펙트럼을 구하고, 식 (13)을 이용하여 감쇠계수를 계산하였다. 측정된 하중과 변형값에 의해 접착층의 전단강도를 계산하고 식 (1)을 이용하여 변형에너지밀도를 구하였다. 재료의 접착접합강도 평가에 매우 중요한 판단 기준이 되는 파괴적 파라미터인 변형에너지밀도와, 이에 대해 초음파 탐상에 의한 비파괴평가에 있어서 중요한 비파괴적 파라미터인 감쇠계수의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 변형에너지밀도가 증가할수록 감쇠계수는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 변형에너지밀도가 최대가 되는 최대변형에너지밀도(ultimate strain energy density)는 접착부재가 파단하기 직전의 수치이므로 이에 대한 감쇠계수를 인장하중을 받고 있는 접착접합부의 강도평가에 이용할 수 있다.

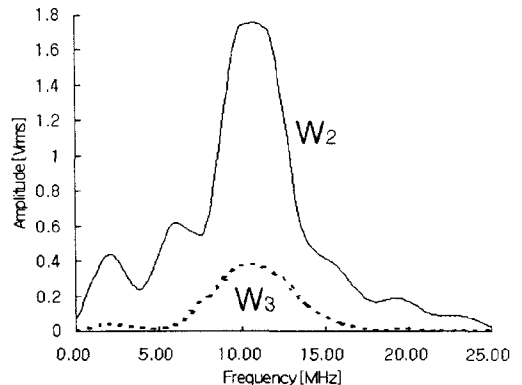


Fig. 6 Amplitude spectra of waveforms W_2 and W_3 in adhesive single-lap joints.

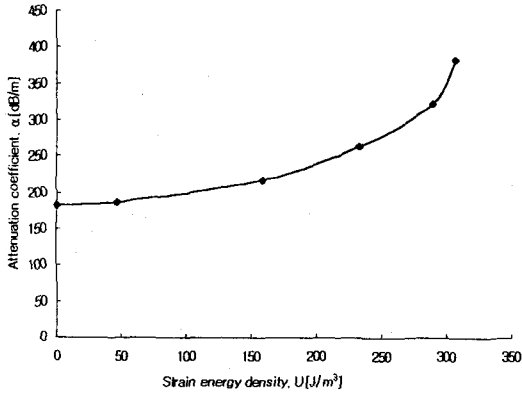


Fig. 7 Strain energy density of adhesive layer and attenuation coefficient of adhesive single-lap joints.

5. 결론

본 연구에서 단순접치기 접착이음에 대한 인장 실험과, 초음파탐상 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단순접치기 접착이음부의 접착층에 대한 변형에너지밀도와 이에 대한 접착접합부의 감쇠계수를 구한 결과 변형에너지밀도가 증가할수록 감쇠계수가 증가함을 확인하였다.
- (2) 변형에너지밀도가 최대가 되는 최대변형에너지밀도(ultimate strain energy density)는 접착부재가 파단하기 직전의 수치이므로 이에 대한 감쇠계수를 인장하중을 받고 있는 접착접합부의 강도평가에 이용할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 변형에너지밀도와 감쇠계수를 이용하여 접착접합부의 강도를 정량적으로 비파괴평가(NDE; non-destructive evaluation)할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) K. L. Mittal, A. Pizzi, 1999, "Adhesion Promotion Techniques," Marcel Dekker, USA, pp. 1~23.
- (2) R. Kline, C. Hsiao, and M. Fidali, 1986, "Non-destructive evaluation of adhesively bonded joints," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 18, pp. 214~217.
- (3) K. Hsu David, and C. Patton Thadd, 1993, "Development of Ultrasonic Inspection for Adhesive Bonds in Aging Aircraft," Materials Evaluation / December, pp. 1390~1397.
- (4) 이원 외, 1995, "초음파법을 이용한 단순접치기 접착이음의 피로손상평가," 한국자동차공학회 '95년도 추계학술대회 논문집 Vol. 1, 한국자동차공학회, pp. 53~59.
- (5) 이원, 정의섭, 유영철, 1997, "자동차에 있어서 구조접착기술," 자동차공학회지 Vol. 19, No. 4, pp. 14~23.
- (6) R. D. Adams. and B. W. Drinkwater, 1997, "Nondestructive testing of adhesively-bonded joints," NDT&E International, Vol. 30(2), pp. 93~98.
- (7) 유영철, 오승규, 이원, 1998, "자동차용 구조접착이음의 응력해석과 강도평가에 관한 연구 - 알루미늄 합금 단순접치기이음의 접착강도," 대한기계학회논문집 A권 제22권 제4호, pp. 905~915.
- (8) V. Pocius Alphonsus, 1997, "Adhesion and Adhesives Technology," Hanser, New York. pp. 1~19.
- (9) 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, 1999, "시간 및 주파수 영역에서의 신호 처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정," 비파괴검사학회지 Vol. 19, No.2, pp. 118~128.