

# 경량 구조재료의 접합강도평가

장철섭\*, 이원+, 오승규<sup>++</sup>

## Joints Strength Evaluation of light Structure material

C. S. Jang\*, W. Yi+ and S. K. Oh<sup>++</sup>

### 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 the strength. It is therefore, essential that a suitable nondestructive test is chosen and its results are correctly interpreted. In this paper, typical ultrasonic signal analysis in adhesive joints are evaluated together with interface stress from the result of finite element analysis.

**Key Words :** Ultrasonic Wave(초음파), Finite Element Analysis(유한요소해석), Nondestructive Evaluation(비파괴평가), Single Lap Joint(단순겹치기 이음)

### 1. 서론

구조접착접합 이음은 일반적인 용접 접합에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있다. 특히, 점용접 등에 비해 고른 응력분포와 상당한 접착강도를 가지기 때문에, 우주선, 자동차, 철도차량, 건축, 전자산업 등 응력완화 및 경량화, 고강도, 고강성을 필요로 하는 구조물의 접합에 그 활용이 늘어나고 있다<sup>(1)(2)</sup>.

Volkersen<sup>(3)</sup>은 1938년 최초로 접착이음의 응력해석을 실시하였으며, 그 후 1944년 접착단부에서 발생하는 굽힘 모멘트까지 고려한 Finite Element Method 해석이 Goland<sup>(4)</sup> 등에 의해 수행되었고, Boundary Element Method에 의한 단순겹치기 이음을 중심으로 Yi<sup>(5)</sup> 등에 의한 연구가 수행된 바 있다.

지금까지 초음파펄스를 이용한 재료평가, 탐상에 관한 많은 연구가 수행되어 오고 있다<sup>(5)-(6)</sup>.

이것은 재료내부를 전파하는 초음파펄스 파형을 시간영역에서 초음파의 전파시간 혹은 수신된 펄스의 강도를 측정하는 기술의 기초가 되고 있으며, 초음파법을 이용한 재료평가에는 이러한 측정파라미터를 기초로 하여 재료 내부를 진행한 초음파의 음속 및 감쇠율 등을 기초로 이론이 전개되고 있다<sup>(7)</sup>.

또한, 최근에는 초음파펄스 파형을 주파수영역에서 재료의 성분, 재질 및 구조 등을 평가하려는 연구가 많이 행해지고 있다<sup>(8)</sup>. 이는 광대역 초음파센서의 개발, 측정기기의 고디지털화, 고정밀도의 연산처리기술이 복합적으로 선행된 결과이며, 초음파펄스 파형 중에서 필요한 파형의 정보만을 이용하여 해석하는 기술이 보고되고 있다<sup>(9)</sup>.

\* 주저자, 인천기능대학 교학처 (csjang@kopo.or.kr)

주소: 403-719 인천시 부평구 구산동 산47

+ 숭실대학교 기계공학과

++ 현대모비스 안전시스템부

본 연구는 접착접합 이음에 대하여 초음파펄스·에코파형을 추출, 그 스펙트럼 분포와 계면에서의 파괴적 거동에 대한 정량적 관계를 밝히는 것을 목적으로 수행하였다.

이를 위하여, 금속재료 내부를 전파하는 초음파펄스 파형을 이용하였다.

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통하여 접착이음의 접합강도에 미치는 영향을 규명하기 위해, Finite Element Analysis를 실시한 데이터를 이용하여, AI 5052-T6 단순겹치기 접착시험편의 인장·전단강도 시험을 실시, 얻어진 초음파신호와 FEA를 통한 구조강도의 접착접합 강도와의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 관련 이론

단순겹치기 이음에서 발생할 수 있는 결함의 전형적인 형태는 크게 3가지 타입으로 분류할 수 있다.

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. 초음파는 비파괴시험에 있어서 가장 일반적인 결함 측정방법이다. 보편적인 실험에서는 1-20MHz의 주파수를 이용하여 전단 혹은 압축파의 펄스는 압전 트랜스듀서에 의해 전달된다. 펄스는 경로를 따라 전달되며, 에너지는 재료의 경계와 같은 불균일한 곳에서 반사한다. 재료의 음향 임피던스의 큰 차이는 에너지의 많은 변화를 야기한다. 왜냐하면, 공기 또는 다른 밀도의 물질을 포함하는 결함은 접착제 혹은 피착체에서 매우 낮은 음향 임피던스를 에 의해 초음파 펄스는 상당수가 반사한다.

시간적으로 분리된 반사 에코의 크기의 변화를 디스플레이하여 결함의 지시를 나타내는 방법을 소위 A-scans이라 부른다. Fig. 1은 단순겹치기 접착 이음에서의 A-scan에 의한 파형을 보여주고 있다.

### 2.1 관련 이론

#### 2.1.1 초음파 파형 해석법

초음파펄스 파형의 검출에는, 일탐촉자법에 의한 탐촉자로

초음파펄스를 입사하여 계면에서 반사하는 초음파펄스·에코 파형을 탐촉자로 검출하였다. 다음으로, 시료의 저면에서 반사되는 초음파펄스·에코 파형을 시간영역으로 추출하였다. 추출된 펄스파형에 대하여 주파수스펙트럼분포를 구하였다.

또한, 초음파펄스·에코법을 이용하여 시험편을 전파하는 초음파의 감쇠율( $\alpha$ )를 측정하였다.

시험편의 감쇠율  $\alpha$ 는 계면에서 반사되는 초음파펄스의 제  $n$ 차 에코의 진폭강도가 피크로 되는 수신진폭강도를  $I_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ )으로 하여, 수신진폭강도가 시간의 증가에 따라 지수관계적으로 감쇠한다고 하여 근사화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{k} \cdot \sum_{n=1}^k \frac{(I_{n+1}/I_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (1)$$

파형의 변화는 일반적으로 평균, 피크-피크, 피크, RMS 등으로 관찰할 수 있다. 이 중에서, RMS는 식(3)과 같이 시간에 대한 변화량과 진동의 에너지량과 관련된 진폭을 표시하므로 진동크기의 표현에 가장 적절하다.

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

여기서,  $x$ 는 파형의 진폭을 뜻한다.

접착접합면을 갖는 계면에서의 하중변화가 발생되면 두 재료를 투과하는 초음파의 펄스는 계면에서 응력변화 및 균

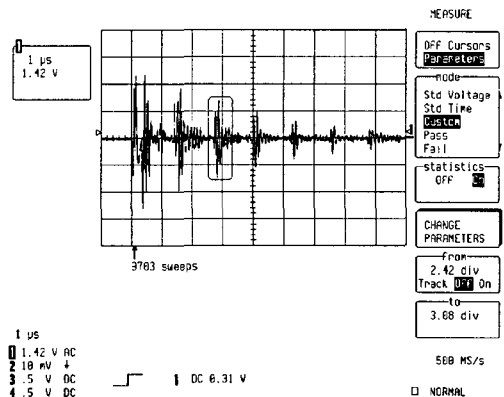


Fig. 1 Change of waveform by tension/shear strength

열의 발생 등에 의해 음압의 세기 및 시간의 변화를 발생시킨다. 그러나, 두 재료의 강성에 비해 접합면에 대한 접합층의 강성이 낮을 경우 음압-시간의 스케일변화를 분석하는데 상당히 어려움이 있다. 이를 위해, 주파수-파위의 함수로써 음압의 스케일을 변환하면 주파수-파위 그래프 변화를 더욱 세밀하게 정량화 할 수 있다.

## 2.2 유한요소해석

실험 결과를 검토하기 위하여 유한 요소 해석을 실시하였다. 해석 프로그램으로는 범용 유한 요소법 프로그램인 NISA2/DISPLAY3를 사용하였으며, 2차원 평면 응력상태에서 4절점 사변형 요소를 적용하였다. Fig. 2는 피착체 및 접착층의 요소 분할예를 나타내었으며, 경계 조건 및 하중 조건으로는 피착체 1의 좌단을 x, y방향으로 변위 구속하고, 피착체 2의 우단을 y방향으로 구속한 후 우단부에 대하여 실험으로부터 구한 인장응력값을 각각 작용시켰다.

재료의 항복조건으로는 von Mises 항복조건식을 사용하여 FEA해석을 실시하였으며, 이 이론은 다축응력상태에서 뒤틀림 에너지밀도가 단축응력상태의 항복뒤틀림 에너지밀도보다 크면 항복이 일어난다는 가정으로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_d > (u_d)_Y$$

즉,

$$1/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] > \sigma_{ys}^2 \quad (3)$$

여기서,  $u_d$ 는 형상변화를 일으키는 뒤틀림에너지밀도를 나타낸다.

## 3. 초음파 실험

### 3.1 시스템의 구성

본 연구에 사용된 주요 기기는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 결합 신호를 송·수신하는 종파 탐촉자(주파수 10MHz, 진동자 크기 : 10mm), 접촉매질(글리세린) 등이

다. Table 1과 Table 2는 각각 시험편의 조건 및 기계적 성질을 나타내고 있다.

## 3.2 실험 방법

### 3.2.1. 접착 시험편

피착체는 #800 페이퍼로 표면 가공을 한 후, 아세톤으로 세정작업을 하였다. 이어서, Al5052-T6를 두께 4mm(제1 피착체), 2mm(제2 피착체), 접착면적을 25mm × 25mm로 하여 Cemedine 1500으로 접착, 전기로에서 80℃로 2시간 온도를 유지 후 냉각하였다.

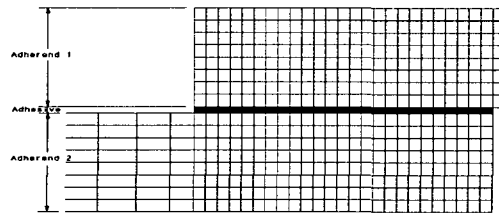


Fig. 2 FEA of the single lap joint

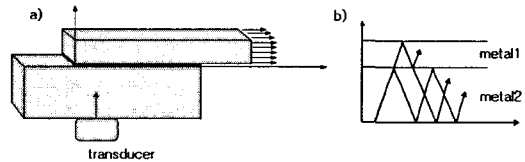


Fig. 3 Signal analysis classification of single lap joints

Table 1 Specimen dimension

| adhesive     | Adherend Thickness (mm) | loading velocity (mm/min.) | bonding area (mm <sup>2</sup> ) |
|--------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Cemedian1500 | 4mm/2mm                 | 0.1                        | 25×25                           |

Table 2 Mechanicals properties of the specimen

|              | E(GPa) | v    | $\sigma_Y$ (MPa) | $\sigma_U$ (MPa) |
|--------------|--------|------|------------------|------------------|
| Al 5052      | 65.47  | 0.37 | 168.9            | 224.8            |
| Cemedine1500 | 1.16   | 0.39 | 18.5             | 37.6             |

### 3.2.2 단순겹치기 접착이음에서의 초음파 신호획득

실험에 의한 신호 취득은 1 point 당 2ns의 간격으로 샘플링하였다. 본 연구에서는 시간 영역상의 특징 추출에 있어서 획득한 주파수파형을 잡음 수준(noise level)을 고려하여 14dB Drop법에 의한 음압의 20%를 기준으로 문턱값을 설정하였다.

### 3.2.3 단순겹치기 접착이음에서의 초음파 주파수 해석

Fig. 3은 초음파 트랜스듀서로부터 발생된 신호의 진행 및 크기를 말한다. 초음파 트랜스듀서로부터 발생된 펄스는 두 계면사이에서 반사파와 투과파로 분해되며, 그 크기는 Fig. 3(b)와 같다. 주파수파형의 획득은 제1 피착체(두께 4mm)와 제2 피착체를 모두 투과한 주파수성분으로부터 응력증가시 주파수파형의 변화에 따른 주파수 변화와 유한요소법으로 구한 응력을 상호 비교하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 인장전단 하중을 부기한 시험편에서의 파형변화

단순겹치기 접착시험편에 대한 초음파 파형은 Fig. 1과 같이 제1 피착체(두께 4mm)를 반사한 파형이 두 번째 에코를 형성하고, 4mm와 2mm를 모두 투과한 반사파형이 세 번째 파형을 형성하고 있다. 본 논문에서는 계면의 응력에 따른 박리현상을 파악할 수 있도록 세 번째 파형에 대한 주파수파형을 선택하였다.

재료에 인장하중 부하시 초음파에 의한 파형은 인장응력의 증가에 따라 제2 피착체에서 반사된 파형이 급격히 감소함을 확인하였으며, 이것은 인장/전단하중 부하시 계면단에서의 응력집중에 의한 박리현상으로 제2 피착체에서 맞고 돌아오는 파형의 소멸을 나타내고 있다.

### 4.2 파형 파라미터와 응력변화와의 상호 관계 비교

유한요소해석에 의해 본 실험과 같이 4mm × 2 mm의 접착면에 대한 응력은 전단응력이 굽힘모멘트에 의한 수직응력보다 약간 큰 것을 확인하였다.

Fig. 4는 von Mises 응력을 좌단 x=0부와 우단 x=L부를 비교·검토한 그래프이다. 그래프에서와 같이 피착체의 두께가 4mm, 2mm로 접착된 피착체의 끝단에서는 약 두배 정도의 응력크기가 다름을 볼 수 있다. 또한, 우측의 끝단부가 좌측의 끝단부보다 응력세기의 기울기가 더 큼을 알 수 있었다. 따라서, 우측 접착 단부에서 먼저 박리가 시작됨을 알 수

있다. 실험에서도 이를 확인하였다. 본 실험에서는 우측단부에서 굽힘응력에 의해 초음파 탐촉자가 떨어지는 것을 확인하여 좌측단부에 탐촉자를 위치시키고 실험을 실시하였다.

Fig. 5는 인장전단 하중에 따른 응력의 변화를 계면에서 반사된 초음파의 감쇠변화로써 나타낸 그래프이다. 그래프에서와 같이 계면단의 응력이 클수록 지수함수적으로 반사계수가 커짐을 알 수 있다.

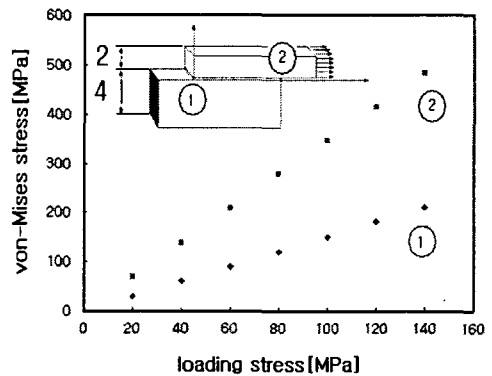


Fig. 4 von-Mises stress distribution at edge interface(y=0)

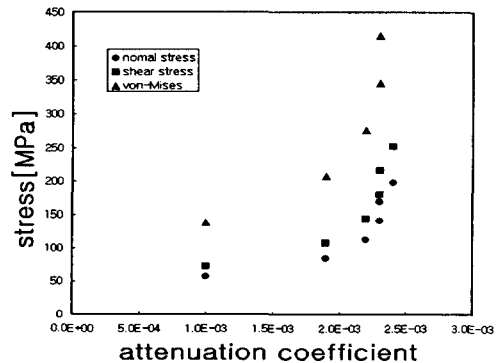


Fig. 5 Relationship of attenuation coefficient vs. stress

주파수파형의 분석에 의한 주파수파워와 계면에 대한 응력의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 응력의 증가시 주파수의 에너지파워 감소는 계면에서의 응력증가로 인한 계면단 박리에 따른 주파수에너지의 소멸을 뜻한다.

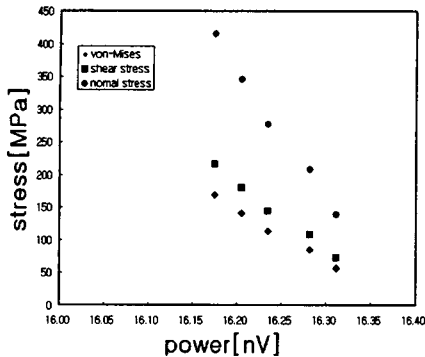


Fig. 6 Relationship of stress vs. wave power

## 5. 결론

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통한 접착이음의 접합강도에 미치는 파라미터의 관계를 규명하기 위해, Al 5051-T6 단순접치기 접착시험편의 인장·전단강도 시험을 통하여, 초음파 파형 파라미터와의 상관관계를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 탐촉자를 부착한 제 1피착체(4mm)에서 인장·전단 하중의 증가에 따른 접착이음부에서 측정된 초음파 파형의 에너지가 점차 감소하는 현상을 나타내고 있다. 이는 계면단 박리의 확대 및 균열 발생에 따른 초음파의 산란반사의 영향으로 인하여 초음파파형 주파수파워가 감소하는 현상에 기인한다.
- (2) 유한요소해석을 통하여 접합접착시험편에 대한 단순 인장/전단 강도해석 결과, 계면단의 양쪽끝단에서 급격한 응력변화를 보이고, 이것을 초음파 파형해석을 통하여 확인하였다.
- (3) 유한요소해석을 통해 계면끝단에서의 수직응력과 전단응력의 비는 4mm/2mm인 경우, 전단응력이 약간 크며, von-Mises 응력으로 해석한 결과 굽힘모멘트가 크게 발생하는 우측끝단에서의 응력값이 좌측단에서의 응력값에 비해 약 2배가 큼을 알 수 있었다. 또한, 이를 인장/전단실험을 통하여 우측단부에서 피착체가 먼저 굽힘을 받는 것을 확인하였다.
- (4) 응력증가에 따른 초음파의 파형양상을 확인 할 수 있었으며, 특히, 파괴역학 파라미터인 von-Mises stress와 주파수파워에 대한 함수는 정량적 비파괴평가를 위한 파라미터로서 유용함을 확인하였다.

이와 같이, 유한요소해석과 초음파 파형을 비교하여 초음파 파형의 변화로부터 접착부위의 응력상태를 예측할 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) Kline, R., Hsiao, C. and Fidali, M., 1986, "Non-destructive evaluation of adhesively bonded joints," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 18, pp. 214~217
- (6) Singher, L., 1997, "Bond strength measurement by ultrasonic guided waves," Ultrasonic, Vol. 35, pp. 305~315
- (7) Dietz, G. Havier, E. A. McGarry, F. J. and Sofer, G. A., 1956, "Ultrasonic Waves as a Measure of Cure," Ind.Engr.Chem., Vol.48, pp.75
- (8) Lindrose, A. M., 1978, "Ultrasonic Wave and Moduli Changes in a Curing Epoxy Resin," Exp.Mech., Vol.18, pp.227
- (9) Goglio, L. and Rossetto, M., 1999, "Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets," NDT&E International, Vol. 32, pp. 323~331