

## 금속재료의 접착이음부에 대한 유한요소해석과 초음파실험

오승규\*, 황영택, 장철섭, 오선세(승실대학교대학원 기계공학과), 이원(승실대학교 기계공학과)

FEM and Ultrasonic Testing for Adhesive Joints Strength of Thin Metal Sheets

S.K. Oh\*, Y.T. Hawng, C.S. Jang, S.S. Oh(Graduate School, SoongSil Univ.), W. Yi(SoongSil Univ.)

### 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 Ultrasonic Signal Analysis in adhesive joints are evaluated together with Interface Stress from the result of Finite Element Method.

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), FEM(유한요소해석), Adhesive Bonded Joint(접착접합이음), Quantitative Nondestructive Evaluation(정량적비파괴평가)

### 1. 서론

구조접착접합 이음은 일반적인 용접 접합에 비하여 여러가지 장점을 들 수 있다. 특히, 점용접 등에 비해 고른 응력분포와 상당한 접착강도를 확인할 수 있기 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 응력 해석을 실시하였으며, 그 후 1944년 접착단부에서 발생하는 굽힘모멘트까지 고려한 FEM 해석이 Goland<sup>(4)</sup> 등에 의해 수행되었고, BEM에 의한 단순겹치기 이음을 중심으로 Yi<sup>(5)</sup> 등에 의한 연구가 수행된 바 있다.

정량적비파괴평가<sup>(6-9)</sup>는 1970년대에 출현한 새로운 개념으로, 그 배경으로는 파괴역학의 영향을 들 수 있다. 파괴역학은 응력세기계수 K 값이 파괴를 결정짓는 중요한 파라미터라는 것이 검증되었으며, 따라서, 부재내의 결함을 정량적으로 평가하는 것이 중요한 일이다. 일반적인 비파괴적 해석방법 중에 펄스-에코 송신기술은 이음의 결함을 검출하기

위해 적용되고 있다. 이러한 기술은 단지 결함의 유무만을 검출할 수 있으나, 펄스-에코의 파형을 분리하여 응력과 상관관계를 해석하려는 연구가 Benson<sup>(10)</sup> 등에 의해 시도되고 있다.

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통하여 접착이음의 접합강도에 미치는 영향을 규명하기 위해, FEM을 실시한 데이터를 이용하여, A1 5052-T6 단순겹치기 접착시험편의 인장·전단강도 시험을 실시 얻어진 초음파신호와 FEM을 통한 구조강도의 접착접합 강도와 상관관계를 분석하였다.

### 2. 원리

#### 2.1 접착접합 이음 구조에서의 결함 종류

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

첫째, poor adhesion, 즉 피착체와 접착제 사이의 약한 결함을 말하며, 대체로 접착 표면층이 접착에 품질적으로 문제가 있는 표층부의 영향을 받는다. 둘째, poor cohesive strength, 즉, 접착시 불완전한 혼합 및 불충분한 경화에 의해 발생하는 강

도를 말한다. 셋째, 복합 기공, 미접합, 미소 기공과 같은 비파괴적으로 검출할 수 있는 기본형태의 결함으로서 공기나 휘발성분이 접착시에 혼입되어 발생되거나, 접착시 불규칙적인 열적 수축등에 의한 경화가 형성되어 결함의 원인이 된다.

## 2.2 관련 이론

### 2.2.1 초음파 파형 해석법

파형의 매개변수로는 Fig. 1과 같이 Event, Energy, 진폭, 지속시간, 상승시간, 쇠퇴시간 등을 들 수 있다. 상하주파수와 중심주파수를 이용한 대역폭은 아래의 식으로 계산되며, 여기서, 하주파수(lower frequency:  $f_L$ )와 상주파수(upper frequency:  $f_U$ )의 합을 2로 나누어주면 중심주파수가 된다.

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

또한, 주파수 파형의 면적을 이용한 파형의 에너지밀도는 다음식과 같다.

$$U = \int_{v_1}^{v_2} |v(t)| dt \quad (2)$$

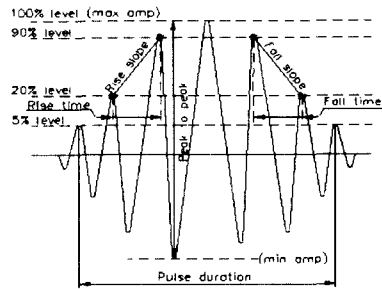


Fig. 1 Parameter of Waveform

### 2.2.2 Von Mises 항복조건식

재료의 항복조건으로는 von Mises 항복조건식을 사용하여 FEM해석을 실시하였으며, 이 이론은 다축 응력상태에서 비틀림 에너지밀도가 단축응력상태의 항복비틀림 에너지밀도보다 크면 항복이 일어난다는 가정으로, 다음과 같은 가정에 의한 조건에서 항복이 일어난다.

$$W_d \geq (W_d)_{ys}$$

즉,

$$1/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] > (W_d)_{ys}$$

여기서,  $W_d$ 는 모양변화를 가져오는 비틀림에너지밀도를 나타낸다.

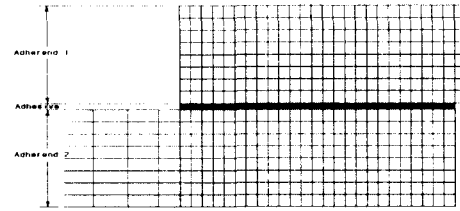


Fig. 2 FEM of the Single Lap Adhesive Joint

## 3. 유한 요소 해석

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.

## 4. 초음파 실험

### 4.1 시스템의 구성

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결함 신호를 송·수신하는 송파 탐촉자(주파수 10MHz, 진동자 크기: 10mm), 접촉매질(글리세린) 등이다. Table 1과 Table 2는 각각 시험편의 조건 및 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 1 Specimen Adhesive and Test Requirement

접착제	피착체두께 (mm)	인장속도 (mm/min.)	접착면적 (mm <sup>2</sup> )
Cemedian1500	4×2	0.1	25×25

Table 2 Mechanics Properties of Specimen

	E(GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)
Al 5052	65.47	0.34	168.9	224.8
Cemedine1500	1.16	0.39	18.5	37.6

4.2 실험 방법

4.2.1. 접착 시험편

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

4.2.2 단순접치기 접착이음에서의 초음파 주파수 해석

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

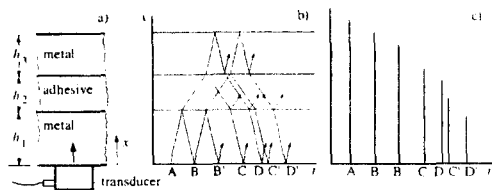


Fig. 3 Signal Analysis Classification of Adhesive Joints

4.2.3 단순접치기 접착이음에서의 초음파 신호 획득

실험에 의한 신호 취득은 1 point 당 2ns의 간격으로 샘플링하였다. 본 연구에서는 시간 영역상의 특징 추출에 있어서 획득한 주파수파형을 잡음 수준

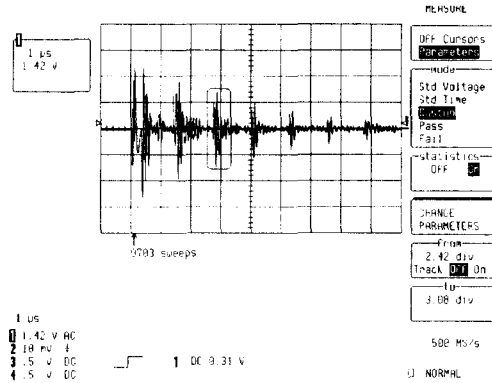


Fig. 4 Change of Waveform by Tension/Shear Strength

(noise level)을 고려하여 14dB Drop에 의한 음압의 20%를 기준으로 문턱값을 설정하였다.

5. 결과 및 토론

5.1 인장·전단 하중을 부가한 시험편에서의 파형변화

단순접치기 접착시험편에 대한 초음파 파형은 Fig. 4와 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.

5.2 파형 파라미터와 응력변화와의 상호 관계 비교

주파수파형의 분석에 의한 주파수에너지 밀도와 하중을 표현하면, Fig. 5와 같다. 그림에서, 하중증가시 주파수파형의 에너지밀도 감소는 주파수파형의 소멸을 뜻하며, 이것은 계면단에서의 균열에 의한 주파수의 산란반사의 영향이 발생함을 뜻한다. Fig. 6은 피착체 계면단 끝단에서의 수직/전단 및 von-Mises 응력을 표현한 것이다. 유한요소해석에 의해 본 실험과 같이 4mm x 2 mm의 접착면에 대한 응

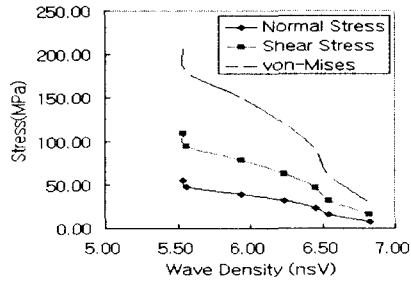


Fig. 5 Relationship of Stress vs. Wave Density

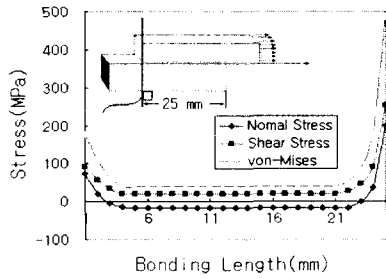


Fig. 6 Stress distribution by Bonding Length(mm)

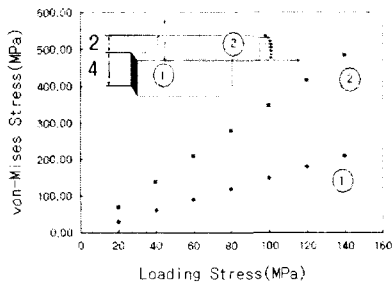


Fig. 7 von-Mises Stress distribution at Edge Interface(y=0)

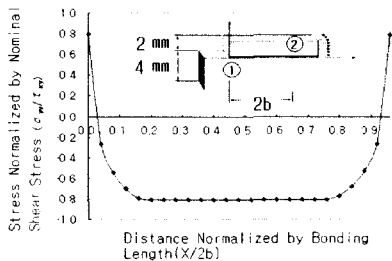


Fig. 8 Stress distribution on the Interface by FEM

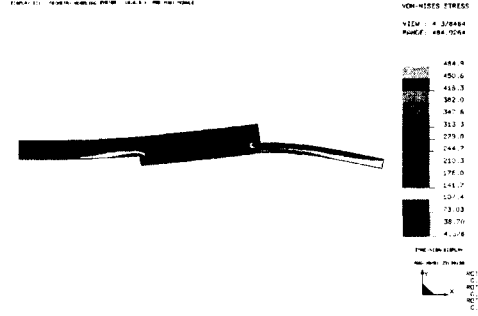


Fig. 9 Deformation of Single Lap Adhesive Joint by FEM(140MPa)

력은 전단응력이 굽힘모멘트에 의한 수직응력보다 약간 큰 것을 확인하였다.

Fig. 7는 von Mises 응력을 좌단  $x=0$ 부와 우단  $x=L$ 부를 비교검토한 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 접착단부에서 먼저 박리가 시작됨을 알 수 있다. 실험에서도 이를 확인하였다. 본 실험에서는 우측단부에서 굽힘응력에 의해 초음파 탐촉자가 떨어지는 확인하여 좌측단부에 탐촉자를 위치시키고 실험을 실시하였다. 이로부터 응력세기의 크기를 수직응력 및 전단응력의 향으로 무차원하여 계면단 길이에 대해 정리하면 Fig. 8과 같다. 이 그래프에서 수직응력은 전단응력으로 나누면 그 크기의 비는 좌우가 대칭이 되는 것을 알 수 있다.

접착접합 계면에 대한 응력변화를 파악하는 것은 곧 그 재료의 수명을 파악할 수 있는 척도가 된다. Fig. 9는 응력증가에 따른 유한요소해석 결과를 보여주는 그림이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통한 접착이음의 접합강도에 미치는 파라미터의 관계를 규명하기 위해, A1 5051-T6 단순겹치기 접착시험편의 인장·전단강도 시험을 통하여, 초음파 파형 파라미터와의 상관관계를 다음과 같이 확인할 수 있었다.

(1) 탐촉자를 부착한 제 1피착체(4mm)에서 인장·전단 하중의 증가에 따른 접착이음부 파형의 밀도가 점차 감소함을 보이고 있다. 이는 계면단 박리의 확

대 및 균열 발생에 따른 초음파의 산란반사의 영향에 의한 초음파파형의 에너지밀도감소 현상으로 볼 수 있다.

(2) 유한요소해석을 통하여 접합접착시험편에 대한 단순 인장/전단 강도해석 결과, 계면단의 양쪽 끝단에서 급격한 응력변화를 보이고, 이것을 초음파 파형해석을 통하여 확인하였다.

(3) 유한요소해석을 통해 계면끝단에서의 수직 응력과 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 피삭체가 먼저 굽힘을 받는 것을 확인하였다.

이와 같이, 유한요소해석과 초음파 파형을 비교하여 초음파 파형의 변화로부터 접착부위의 응력상태를 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 참고 문헌

(1) T. Mori, "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. 1991

(2) W. Asai, "Status of Adhesive Bonding Technologies for Aircrafts," Journal of the Adhesive Society of Japan, Vol.25, No.10, pp.474~477. 1989

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

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

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

(6) Thomas F. Perrone, "Principles of

Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds, Journal of the American Society for Nondestructive Testing," Vol. 50,11, pp.1268~1273, 1992

(7) ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. V, "Standard Practice for Liquid Penetrant Inspection Method," pp.455~472, 1995

(8) ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. V, "Magnetic Particle Examination," pp.151~156, 1995

(9) 이원, 윤인식, 황영택, 유영철, 정의섭, "초음파법을 이용한 용접부의 결함 검출과 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), pp.41~46, 1996

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