

구조접착 이음에서의 접합강도해석과 초음파실험

장철섭(승실대 대학원 기계공학과), 오승규(현대모비스 안전시스템부), 김종현*(승실대 대학원 기계공학과), 황영택(승실대 대학원 기계공학과), 이 원(승실대 기계공학과)

Bonding Strength Analysis and Ultrasonic Testing of Structural Adhesive Joints

C. S. Jang(Mech. Eng. Dept., SSU), S. K. Oh(Safety System R&D Dept., Hyndai Mobis), J. H. Kim(Mech. Eng. Dept., SSU), Y. T. Hwang(Mech. Eng. Dept., SSU), W. Yi(Mech. Eng. Dept., SSU)

ABSTRACT

This article discusses the use of pulse-echo ultrasonic testing for the stress analysis of adhesive bonds between metal sheets. The method is based on the measurement of the reflection wave at the metal/adhesive interface. After describing briefly the physical aspects of the phenomenon, an index is defined to detect defective zone of the joint(both for the lack of adhesive and for insufficient adhesion); the influence of the experimental variables(variable stress...) on the measurement is discussed. By means of a control experiment it is shown that Stress Variation in Adhesive Joints are separate to be distinguished. In this paper, Quantitative Nondestructive Evaluation in Adhesive Joints are evaluated together with Ultrasonic Testing and Finite Element Method.

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), FEM(유한요소법), Adhesively Bonded Joint(접착접합이음), Quantitative Nondestructive Evaluation(정량적 비파괴 평가)

1. 서론

구조접착접합 이음은 일반적인 접합법이 어려운 이종재료나 경량화를 필요로 하는 부위에 상당한 접착강도와 고른 응력분포를 확인할 수 있기 때문에, 우주선, 자동차, 철도차량, 건축, 전자산업 등 구조물의 접합에 그 활용이 늘어나고 있다⁽¹⁾⁽²⁾.

Volkersen⁽³⁾은 최초로 접착이음의 응력해석을 실시하였으며, 초음파 펄스-에코 반사법을 이용하여 금속판 사이에 위치한 접착접합이음부에 대한 연구가 Goglio⁽⁴⁾에 의해 수행되었다. 특히, Kline⁽⁵⁾ 등은 초음파의 속도와 감쇠가 접착부의 피로손상에 따른 접착제의 경화와의 관계를 발표하였다.

정량적비파괴평가^{(6),(7),(8)}는 그 배경으로 파괴역학의 영향을 들 수 있다. 파괴역학은 응력세기계수 K 값이 파괴를 결정짓는 중요한 파라미터라는 것이 검증되었으며, 부재내의 결함을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다.

이와 같이, 결함으로부터 형상을 인식하고 판별함으로써 부재내의 응력과의 관련성의 연구를 위해,

Schmerr⁽⁹⁾등은 용접부 결함으로부터의 신호를 이용한 초음파 형상 인식 기법을 사용하여 용접 결함 분류^{(10)~(12)}를 하였다. 또한, Liu⁽¹³⁾는 표면파의 산란과 시험편의 형상계수를 이용하여 표면변위에 따른 응력세기계수를 검토하였다.

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통하여 접착이음의 접합강도에 미치는 영향을 규명하기 위해, Al 5052-T6 단순겹치기 접착접합시험편의 인장-전단강도 시험을 통하여 얻어진 초음파의 음압-시간의 파형을 주파수해석을 통하여 접착접합 이음강도와의 상관관계를 분석하였다.

2. 관련이론

2.1 계면균열에 대한 에너지해방률

Fig. 1과 같이 단순겹치기 접착접합 이음에 대한 균열 계면선단에서의 에너지해방률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

여기서, K_I , K_{II} 는 계면균열의 응력세기계수를 나타내고, μ 는 전단탄성계수, ν 는 프와송비, $2a$ 는

접착길이를 나타낸다. 본 연구에서는 계면에 대한 전에너지해방률에 대한 식(6) $G_T(14)$ 와 응력세기 계수 K_I, K_{II} 에 대한 식(2)를 이용하여 계면에 대한 응력해석을 하였다.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{K_I + iK_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{2a}\right)^{2ae} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \\ K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \\ Q &= \epsilon \log\left(\frac{r}{2a}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{k_1/\mu_1 + 1/\mu_2}{k_2/\mu_2 + 1/\mu_1} \right] \quad (3)$$

$$k_i = \begin{cases} 3 - 4\nu_i & (\text{plane strain}) \\ \frac{3 - 4\nu_i}{1 + \nu_i} & (\text{plane stress}) \end{cases} \quad (4)$$

$$K_i = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (5)$$

$$G_T = \frac{1}{16 \cos h^2(\epsilon\pi)} \left[\frac{k_1 + 1}{\mu_1} + \frac{k_2 + 1}{\mu_2} \right] (K_I^2 + K_{II}^2) \quad (6)$$

2.2 주파수 파형해석

파형의 변화는 Fig. 2와 같이 평균, 피크-피크, 피크, RMS 등으로 관찰할 수 있다. 이 중에서, RMS는 식(7)과 같이 시간에 대한 변화량을 고려하고, 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로 진동크기의 표현에 가장 적절하다.

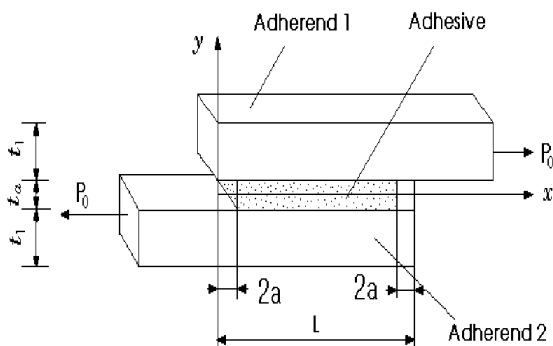


Fig. 1 Test specimen of adhesively bonded lap joints

$$S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (7)$$

여기서, X 는 파형에 대한 진폭을 뜻한다.

접착접합면을 갖는 계면에서의 하중변화가 발생되면 두 재료를 투과하는 초음파의 펄스는 계면에서 응력변화 및 균열의 발생 등에 의해 음압의 세기 및 시간의 변화를 발생시킨다. 그러나, 두 재료의 강성에 비해 접합계면에 대한 접합층의 강성이 낮을 경우 음압-시간의 스케일변화를 분석하는데 상당히 어려움이 있다. 이를 위해, 주파수-파위의 함수로 음압의 스케일링을 변환함으로써 주파수-파위 그래프 변화를 더욱 세밀하게 정량화 할 수 있다.

3. 유한 요소 해석에 의한 에너지 해방률의 검토

실험 결과를 검토하기 위하여 유한 요소 해석을 실시하였다. 해석 프로그램으로는 범용 유한요소 프로그램인 NISA2/DISPLAY3를 사용하였으며, 2차원 평면 변형률 상태에서 4절점 사변형 요소를 적용하고, 절점수 2738개, 요소수는 2442개이다.

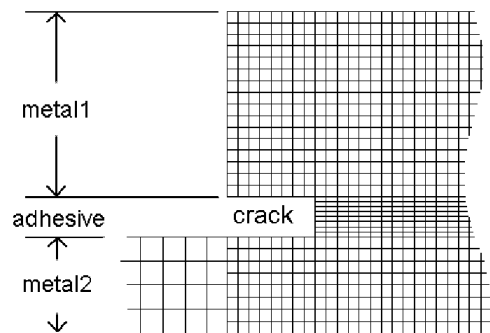


Fig. 2 FEA of the single lap adhesive joint

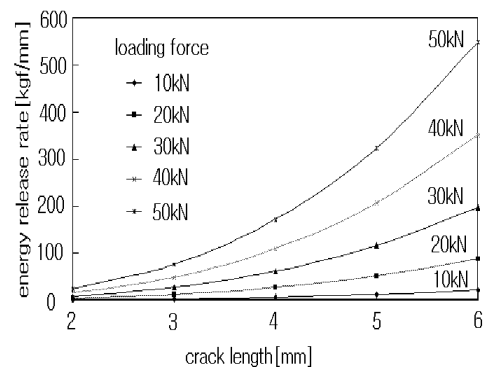


Fig. 3 Comparison of energy release rate and crack length by FEA

Table 1 Specimen and test requirement

Adherend Thickness (t_1, t_2)	인장속도 (V)	접착면적 (A)	접착층 두께 (t_a)	균열길이 (a)
4mm	0.1 mm/min.	25 × 25 mm ²	0.3 mm	0.2 mm 0.4 mm 0.6 mm

Table 2 Mechanics properties of specimen

adherend and adhesive	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

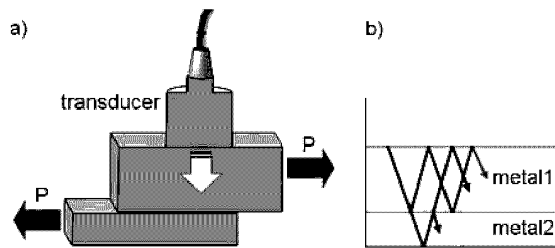


Fig. 4 Signal analysis classification of adhesively lap joints

Fig. 3은 피착체 및 접착층의 요소 분할 예를 나타내었으며, 경계 조건 및 하중 조건으로는 피착체 1의 좌단을 x, y방향으로 변위 구속하고, 해석 및 초음파주파수 분석을 원활하게 하기 위하여 접착층두께 0.3mm, 양단에 균열을 0.2, 0.4, 0.6mm를 삽입하고, 피착체 2의 우단을 y방향으로 구속한 후 우단부에 대하여 실험으로부터 구한 인장응력값을 각각 작용시켜, 계면단에서의 응력값을 구하고, 응력값을 식(2)에 대입시켜 식(6)에 따른 에너지해방률을 구하였다.

본 논문에서는 FEA에 의해 해석된 균열길이에 따른 접착면적에서의 에너지해방률을 구하고, 균열길이에 대하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그리고, 에너지해방률이 균열대비 하중증가에 따라 크게 증가하고 있음을 확인하였다. 이를 통하여, 계면단에서의 에너지해방률을 초음파파형 분석에 의한 주파수-파위와 비교하였다.

4. 초음파 실험

4.1 시스템의 구성

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를

송수신하는 펄스 리시버(JSR사의 PR35), 펄스 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결합 신호를 송·수신하는 종파 탐촉자(주파수 10MHz, 진동자 크기 : 10mm), 접촉매질(글리세린) 등이다. Table 1과 Table 2는 각각 시험편의 조건 및 기계적 성질을 나타내고 있다.

4.2 실험 방법

4.2.1. 접착 시험편

피착체는 페이퍼로 표면 가공 후, 아세톤으로 세정작업을 하였다. 이어서, A15052-T6를 두께 4mm(제1 피착체), 4mm(제2 피착체), 접착면적을 25mm × 25mm, 두께 0.3mm의 테프론필름을 이용하여 균열길이를 각각 0.2, 0.4, 0.6 mm로 하여 cemedine 1500으로 접착, 전기로에서 80℃로 2시간 온도를 유지 후 노냉하였다

4.2.2 단순겹치기 접착이음에서의 초음파 신호 획득 및 주파수해석

Fig. 5는 초음파 트랜스듀서로부터 발생된 신호의 진행 상태를 말한다. 초음파 트랜스듀서로부터 발생된 펄스는 Fig. 5(b)와 같이 두 계면사이에서 반사파와 투과파로 분해된다.

본 실험에서 사용된 피착체의 두께는 4mm이고, 접착층의 두께는 0.3mm이며, 주파수파형이 오실로스코프에 잡히는 파형은 초음파가 피착체1에서 반사된 제1 진폭에서 가장 크고 나머지 파형은 Fig.6과 같이 계면에서 반사된 파형이 반사횟수에 따라 지수적으로 감소된다. 본 논문에서는 피착체와 접착체 계면이 만나는 부위에 대한 응력해석을 검토하기 위해 피착체와 접착체가 접착된 제1 계면의 파형을 분리하여 선택하였다. 또한, 응력증가시 균열선단에서의 주파수파형의 변화에 따른 주파수-파위 변화와 유한 요소법으로 구한 응력을 상호비교하였으며, 실험에 의한 신호는 1 point 당 2ns의 간격으로 샘플링하였다.

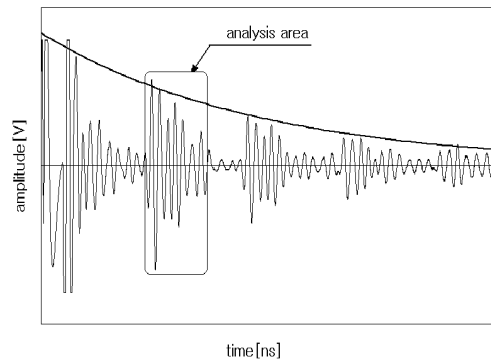


Fig. 5 Waveform by tension/shear strength

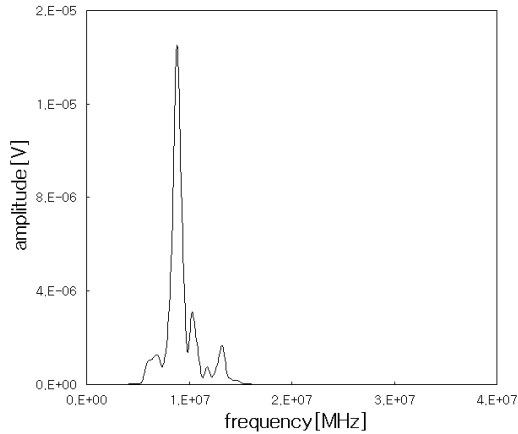


Fig. 7 Frequency vs. amplitude waveform by FFT

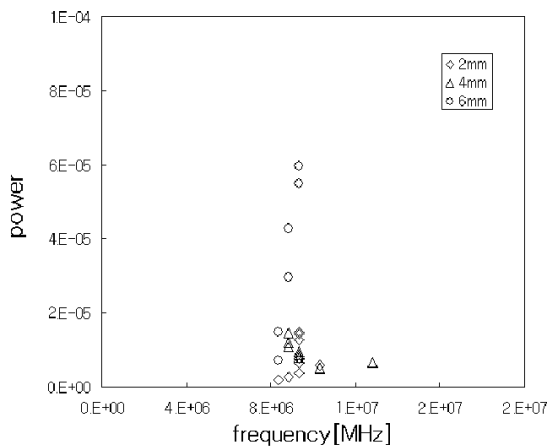


Fig. 8 Relationship of frequency vs. power

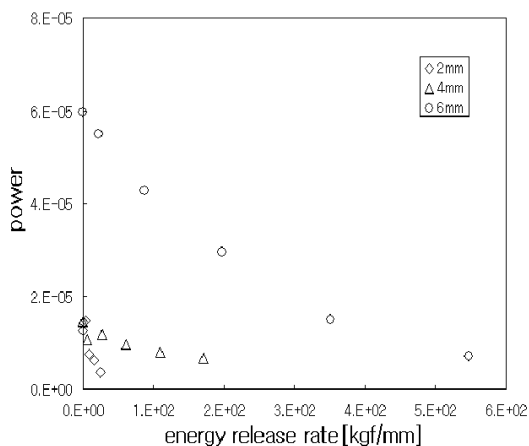


Fig. 9 Relationship of energy release rate vs. power

5. 결과 및 토론

5.1 주파수-파워의 상호관계 비교

Fig. 7은 Fig. 6에서 발생된 초음파의 반사파에서 계면에서 반사된 초음파의 반사파형을 FFT변환에 의해 주파수 변환한 그래프이다. Fig. 8은 접착층의 균열길이에 따른 주파수를 주파수-파워의 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 FFT 변환에 의해 초음파 반사파의 크기를 나타낼 수 있으나, 접착접합 계면에서의 단순접치기 접착이음의 파단양상은 일정한 파형의 크기로 나타나지 않고, 접착계면에서의 균열의 크기가 작을수록 파형의 산란양상이 큼을 알 수 있다. 그러나, 접착크기가 가장 큰 6mm 균열길이에서는 FFT변환에 의한 주파수-파워의 그래프가 일정한 관계로 잘 나타남을 확인할 수 있다. 따라서, 균열길이가 일정수준 이상 크고, 균열 선단에서의 응력이 크게 발생할수록 파형의 측정에 의한 균열의 크기를 쉽게 알 수 있으나, 균열길이가 작을수록 그 파형에 의한 균열양상을 파악하기는 상당히 어려움을 알 수 있다.

5.2 에너지해방률과 주파수 파워에 대한 비교분석

Fig. 9는 유한요소해석으로부터 구한 에너지해방률을 균열길이에 따라 초음파의 파워함수로서 나타낸 그래프이다. 그림에서, 에너지해방률은 균열길이가 증가할 수록 크기가 증가함을 알 수 있고, 결합에 따른 초음파의 파워는 에너지해방률이 클 수록 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, Fig. 8과 같이 FFT 변환에 의해 단순한 주파수성분만을 확인한 데이터는 균열의 크기가 작을 수록 그 파단형상을 알기 쉽지 않으나, Fig. 9와 같이 주파수파워와 에너지해방률을 비교한 그래프에서는 균열의 길이가 비교적 적은 구간에서도 그 크기를 비교적 잘 나타낼 수 있다. 실험에서는 균열이 발생하는 시점에서 취성파단을 일으키기 때문에, 균열발생 이후의 파형분석은 고려하지 않고, 균열길이에 대한 파괴역학 파라미터인 에너지해방률을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 초음파의 파형해석을 통한 접착이음의 접합강도에 미치는 파라미터의 관계를 규명하기 위해, Al 5051-T6 단순접치기 접착시험편의 인장-전단강도 시험과 유한요소해석을 통하여, 초음파 파형 파라미터와 파괴역학 파라미터와의 관계를 다음과 같이 확인할 수 있었다.

(1) 하중의 증가에 따른 1회 저면반사된 접착이음부 파형은 반사파의 크기가 지수적으로 감소함을 보이고 있다. 이는 계면단에서의 응력증가에 따른 임피던스의 증가로 인한 초음파파형의 에너지밀도감소 현상으로 볼 수 있다.

(2) 유한요소해석을 통하여 접착접합 시험편에 대한 단순 인장/전단 강도해석 결과, 계면단의 양쪽 끝단에서 전단하중 증가에 따라 급격한 응력변화가 나타남을 보이고, 이것을 초음파 파형해석을 통하여 확인하였다.

(3) 균열길이에 따른 초음파의 파형을 FFT를 통하여 파형양상을 확인 할 수 있었으며, 특히, 파괴 역학 파라미터인 에너지해방률과 주파수파위에 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. 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. L. Goglio and M. Rossetto, "Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets," NDT&E International, Vol. 32, pp. 323-331, 1998.
5. R. Kline, C. Hsiao and M. Fidali, " Non-destructive evaluation of adhesively bonded joints," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 18, pp. 214-217, 1986.
6. K. Honjoh, Y. Sudoh and J. I. Masuda, " Evaluation Technique for Metal Properties by Analyzing Ultrasonic Spectrum," 非破壊検査, Vol.39, No.7, pp. 587-593, 1990.
7. S. Matsubara, Y. Yokono and T. Imanaka, "Diagnosis of Material Degradation by Ultrasonic Wave," Vol.46, No.3, pp. 185-190, 1997.
8. W. Yi, I. S. Yun, Y. T. Hwang, Y. C. Yu, and E. S. Chung, "Defect Detection and Evaluation of Weld Zone by using Ultrasonic Method," Journal of the Korea mechanical engineers, Autumn Conference Proceeding(I), pp. 41-46, 1996.
9. S. J. Song, and L. W. Schmerr,, "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments using Probabilistic Neural Networks," Journal of Non-destructive Evaluation, Vol.11, pp.69-77, 1992.
10. 이강용, 김준섭, "UT 신호형상 인식을 위한 Intelligence Package 개발과 Austenitic Stainless Steel Welding부 결함 분류에 관한 적용 연구," 한국비파괴검사학회지, Vol.15, No.4, pp.531-539, 1995.
11. 심철무, 최하림, 백홍기, "파지이론을 이용한 압력용기 용접부 초음파 결함 특성 분류," 비파괴검사학회지 제17권, 제1호, pp.11-22, 1997.
12. L. W. Schmerr, "Ultrasonic Flaw Classification an expert system approach," in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.8A, eds, Thompson, D. O. and Chimenti, D. E., pp.657-664, 1989.
13. S. W. LIU, J. C. SUNG and C. S.CHANG, "Transient scattering of rayleigh waves by surface-breaking and sub-surface cracks," Int. J. Engng Sci.