연 구 논 문

초음파 신호분석을 이용한 접착접합 이음의 파괴역학적 평가

한준영* · 오승규** · 윤송남*** · 이 원**** · 장철섭***** · 김민건****** · 김환태*******

*인천기능대 산업설비자동화과
**현대모비스 안전시스템부
***숭실대학교 기계공학과 대학원
****숭실대학교 기계공학과
*****서울정보기능대 산업설비과
******강원대학교 기계-메카공학과
*******한국과학기술정보연구원 전문연구위원

A Fracture Mechanics Approach to Adhesively Bonded Joint Using Ultrasonic Signal Analysis

Jun Young Han*, Seung Kyu Oh**, Song Nam Yun***, Won Lee****, Chul Sup Jang*****, Min Gun Kim****** and Hwan Tae Kim*******

*Dept. of Automation of Industrial Installation, Incheon Polytechnic College, Incheon403-719, Korea
**Safety System R&D Dept. Hyundai Mobis, Yongin 449-910, Korea
***Dept.. of Mechanical Engineering, SoongSil University Graduate, Seoul 156-743, Korea
****Dept.. of Mechanical Engineering, SoongSil University, Seoul 156-743, Korea
*****Dept. of Industrial Installation, Seoul Information Polytechnic College, Seoul 157-015, Korea
******Dept. of Mechanical-Mechatronics, Kangwon National University, KangWonDo, 200-701, Korea
*******Senior Research Fellow, Korea Institute of Science and Technology Information, Seoul 130-742, Korea

Abstract

In automobile industry, it is necessary to reduce the weight from the view point of energy and environmental problems in these days. One of the ways for weight reduction is using adhesive aluminum structures. In this study, ultrasonic signals reflected from the adhesively bonded joint layer are used to evaluate the adhesively bonded joints. FFT is performed to determine bond-layer parameters such as effective thickness and frequency for adhesively bonded joint Al 6061 plates in comparison with the measured and theoretical ratios. And the parameters of ultrasonic wave and the J-integral are investigated to evaluate the adhesively bonded joint strength by DCB specimens.

* Corresponding author : jyhan@kopo.or.kr
(Received June 9, 2003)

Key Words : Ultrasonic wave, Waveform analysis, J-integral, Adhesively bonded joint, Light weight body

1. 서 론

자동차산업은 에너지, 지구환경 등의 사회적인 요구에 따라 대폭적인 연비의 개선이라는 과제에 직면해 있다. 이러한 연비의 개선에 대한 효과적인 해결책의 하나는 자동차를 경량화하는 것으로 자동차 차체에 비강도가 높은 합금을 사용하는 것이 가장 직접적인 해결방법이 될 수 있다. 그러나 이의 실현을 위해서는 해결해야할 과제가 적지 않으며 그 중 한가지는 접합법에 관한 문제이다. 일반적으로 자동차 차체의 접합에는 스폿용접, 이산화탄소아크용접 등이 사용되고 있으나 이는 재질의 변화, 변형, 잔류응력의 내재 등 많은 문제점을 야기하고 있다. 이로 인하여 접착접합, 웰드본딩과 같은 접합법에 많은 관심이 모아지고 있다[1]. 실제로 자동차 차체의 접합에 있어서 접착접합을 병용하므로써 차체 강성이 향상되었다는 연구보고도 있다[2].

자동차구조용 박판강의 이음 부분에 대한 구조 접착

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

제의 사용은 경비절감, 진동흡수성, 절연성 등과 같은 여러가지 장점을 제공하고 있다. 또, 재료에 열을 가할 수 없는 이음 영역에 적용할 수 있으며, 용접의 경우 보다 균일한 응력분포를 가지게 할 수 있다.

그러나, 접착접합 이음에 대한 접합강도 평가는 계면에 따른 응력 분포 및 결함의 검출에 상당히 어려운 실정이다. 따라서, 응력작용 하에 대한 접착이음부에 대한 평가는 상당히 중요한 의미를 보여준다.

정량적 비파괴평가[3-5]를 위한 가장 손쉬운 방법으로는 파괴역학의 응용을 들 수 있다. 그 중에서 초음파를 이용한 펄스-에코법은 이음의 결함을 검출하기 위해 적용되고 있다.

본 연구의 목적은 파괴모드가 다른 단순 겹치기 접착 시험편 및 DCB(double cantilever beam) 시험편의 접착이음에 대하여 주파수 파형분석을 통한 정량적 비파괴평가의 방법을 확립하는 것이다.

2. 관련 이론

2.1 파괴역학 이론

Ripling과 Mostovoy는 Fig. 1에서 나타낸바와 같은 접착접합 시험편의 G_{Ic}를 다음과 같이 나타내었다.

$$G_{Ic}=\frac{4P_C^2}{Eb^2}\left[\frac{3a^2}{h^3}+\frac{1}{h}\right] \tag{1}$$

여기서, P_C는 임계 작용하중이고, a는 균열 길이, $2h$는 DCB 시험편의 높이, b는 시험편 너비, E는 시험편의 탄성계수이다. 윗 식은 접착층의 기계적 성질과 두께를 고려하지 않았다[6].

$$L_p=\frac{(B\alpha_1-D)+\sqrt{\psi}}{Bq} \tag{2}$$

$$\psi=B(\alpha_1-D)^2+B(A+2B\alpha_2+2D\alpha_1)$$

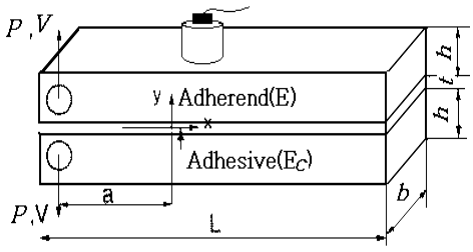

Fig. 6 Specimen geometry of the DCB specimen used in the FCG testing

여기서, A,B,C 는 적분상수이고, L_p는 소성하중이 작용되는 길이, $\psi, \alpha_1, \alpha_2, q$는 재료의 기계적 성질에 의해 결정되는 값이다.

실제 DCB 시험편의 파괴는 Fig. 2에서 나타낸바와 같이 처음 균열 선단의 소성 변형으로부터 시작된다.

탄소성 문제를 해결하는데 경로에 따르는 J-적분이 적절한 파괴역학 파라미터이다[7]. 이를 위해, Yamada는 DCB 시험편에 대해 아래의 식을 제안하였다.

$$J=-2\frac{P}{b}\left(\frac{-Pl_f^2}{2EI}+R_1\right)+\frac{k(K_1^2+K_2^2+K_3^2+K_4^2)}{b} \tag{3}$$

여기서 R_1, K_1, K_2, K_3, K_4는 적분 상수로서 접착체와 접착제의 기계적 성질과 시험편의 기하학적 특성에 의존하며, k는 접착체와 접착제의 탄성거동에 의하여 얻어진다.

$$k=\frac{E_s b}{t} \tag{4}$$

여기서, E_s는 접착층의 탄성계수, b는 시험편의 폭, t는 접착층 두께이다.

2.2 박층의 수직통과율과 반사율

Fig. 3 에서 나타낸 것과 같이 제1매질(Z_1)과 제3

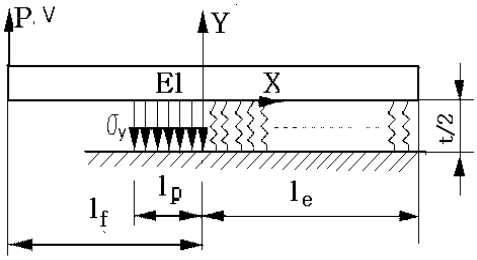

Fig. 8 Model for elastic/plastic fracture of a bonded DCB specimen

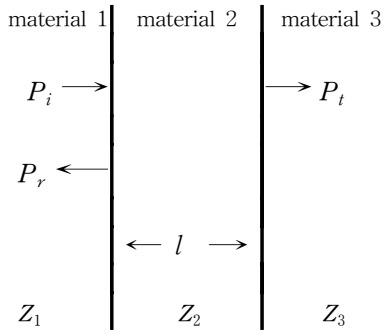

Fig. 3 Transmission and reflection of plane waves normally incident onto layer

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

매질(Z_3)사이에 제2매질(Z_2)의 층, 두께 l, 파장 λ_2가 존재하는 경우에 초음파가 제1매질로부터 경계층에 수직으로 입사하는 경우 음압반사 r_{13}율 과 음압통과율 t_{13}은 다음의 식으로 주어진다[8].

$$r_{13} = \frac{P_r}{P_i} \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_3}-1\right)+j\left(\frac{Z_1}{Z_2}-\frac{Z_2}{Z_3}\right)\tan k_2 l}{\left(\frac{Z_1}{Z_3}+1\right)+j\left(\frac{Z_1}{Z_2}+\frac{Z_2}{Z_3}\right)\tan k_2 l} \tag{5}$$

$$t_{13} = \frac{P_t}{P_i} \frac{2}{\left(\frac{Z_1}{Z_3}+1\right)+j\left(\frac{Z_1}{Z_2}+\frac{Z_2}{Z_3}\right)\tan k_2 l} \tag{6}$$

여기서, P_i는 입사파의 음압

P_t는 반사파의 음압 $k_2 = 2\pi/\lambda_2$, j는 $\sqrt{-1}$ 이다.

또, DCB접합접착이음에서 동일 재료의 접합일 경우 $Z_1 = Z_3$이므로 윗 식의 절대값은 다음과 같다.

$$|r| = \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_2}-\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{\sqrt{4\cot^2 k_2 l+\left(\frac{Z_1}{Z_2}+\frac{Z_2}{Z_1}\right)}} \tag{7}$$

$$|t| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_2 l+\frac{1}{4}\left(\frac{Z_1}{Z_2}+\frac{Z_2}{Z_1}\right)\sin^2 k_2 l}} \tag{8}$$

에너지 투과율은 음압투과율의 제곱으로 계산된다.

2.3 주파수 파형해석

재료부재에 하중작용에 의한 응력변화가 발생하면 재료내의 임피던스는 초음파의 음속 및 밀도변화에 상당한 영향을 미친다[9]. 따라서, 이러한 임피던스 변화에 영향을 미치는 하중변화에 따른 주파수 파형의 변화를 이용하여 접합부에서 측정한 투과 또는 반사파의 초음파 파형을 FFT 변환하여 주파수 스펙트럼을 얻었다. 이 스펙트럼의 변화와 접착층의 두께와의 관계를 비교하여 특정주파수를 얻었다

Fig. 4는 스펙트럼을 주파수 공간에서 나타낸 것이다. 여기서 각각의 주파수를 독립한 좌표축으로 한 무한차원 공간에서 하나의 스펙트럼은 이 무한차원 공간의 한 점으로 나타낼 수 있다. 이 무한차원에서 일정 주파수범위(▥)로 주파수를 분할하여 n개의 측정점을

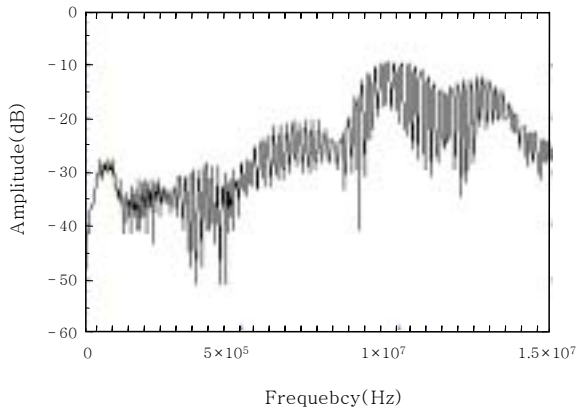

Fig. 4 FFT Analysis of adhesive joints

선택하여 n차원의 유한공간을 구성할 수 있다. 이 n 차원에서 스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$T_i = [F(\omega_1)_i, F(\omega_2)_i, \cdots\cdots, F(\omega_n)_i] \tag{9}$$

여기에서 첨자 i는 i번째 측정치를 나타낸다. $F(\omega_j)_i$는 i 번째 측정치의 j 번째 주파수의 스펙트럼의 강도이다. 접합부에서 반사한 초음파 주파수 스펙트럼은 두께의 변화 등에 큰 영향을 받는다. 탐촉자가 접촉매질 두께의 영향을 받지 않고 입사에너지를 일정하게 하기 위하여 스펙트럼의 절대치를 1로 정규화 한다.

즉, $|T_i| = \sqrt{\sum F(\omega_j)_i^2} = 1$ (10)

다음 하중에 변화에 따르는 주파수 스펙트럼의 n차원 단위벡터의 각 성분을 구하여 상관관계를 비교하였다.

3. 실 험

3.1 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 종파용 탐촉자(주파수 10MHz, 진동자 크기 : 10mm), 그리고 접촉매질(글리세린) 등이다. Table 1은 시험편의 기계적 성질과 초음파특성을 나타내고 있다.

3.2 초음파 신호획득 및 분석

초음파 트랜스듀서로부터 발생된 펄스는 두 계면사이에서 반사파와 투과파로 분해된다. 초음파 파형의 감쇄계수 및 주파수에너지 밀도분석은 제 1저면 반사파를

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

Table 1 The ultrasonic characteristics of materials

medium	density ρ (103 kg/m^3)	velocity of longitudinal wave C (m/s)	impedance Z (10 kg/m^{2}s)
Al 6061	2.72	6,154	16.74
Cemedine	1.28	2,270	2.90
Glyceline	1.06	1,687	1.74

이용하여 파형을 분리하였으며, 실험에 의한 신호는 2ns의 간격으로 샘플링 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 응력하중 분포

Fig. 5 응력-하중 선도에서 비선형 변형은 접착층의 두께에 관계없이 거의 모두 약 0.66kN에서부터 시작된다. 그러나 접착층이 두꺼워 지면서 비선형 구간이 증가하며 파괴 하중도 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 2에서 l_p의 길이가 두께의 증가에 따라 커지기 때문이라고 생각된다. 그리고, 선형구간 초기 영역에서의 실험데이터는 재료내부적인 접착접합 상태에 따라 생기는 하한계 상태에 기인된 영향으로 초기 기울기에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이러한 영향에 대한 보다 정밀한 평가를 위한 실험 및 해석이 앞으로의 과제라 생각된다.

4.2 초음파 주파수 분석

실제 접착접합 구조물에서의 접착층 두께는 일반적으로 0.3mm가 넘지 않으며, 본 논문에서 제시된 시험부재와 같은 시험편에서의 파괴하중은 0.2mm정도의 접착층 두께에서 가장 큰 파괴하중을 나타내며(11), 이후 접착층 두께가 더 두꺼우면 급격하게 파단강도가 떨어지므로 시험에서는 접착층의 두께를 0.2mm까지만 한정하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 DCB시험편 cemedine 1500, 16mm×25mm×0.1mm의 인장하중과 초음파 신호와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 인장의 탄성구간(0.7KN이하)에서는 초음파신호가 거의 변화가 없었으며 소성변형이 일어나면서 대부분 대역에서 반사 진폭이 증가함을 나타내고 있었으며 9MHz에서 감쇄하다 파괴가 시작되면 다시 급격히 증가하는 양상이 나타나고 있었다. Fig. 7에서 8MHz -13MHz사이에서 초음파 신호는 비교적 큰 파동을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 이 구간을 고찰구간으로 하면 파괴 직전의 여러 가지 초음파 특성을 쉽게 알아낼 수 있을 것이며 파괴를 미리 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 DCB 접착시험편 Cemedine 1500, 16mm×25mm×0.2mm의 인장강도와 초음파신호와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 8에서도 Fig. 6과 마찬가지로 탄성구간 (0.66KN이하)에서는 초음파신호의 강도가 거의 변화가 없었으며 인장력이 증가함에 따라 고주파수 대역에서는 감쇠를 나타내고 저주파수 대

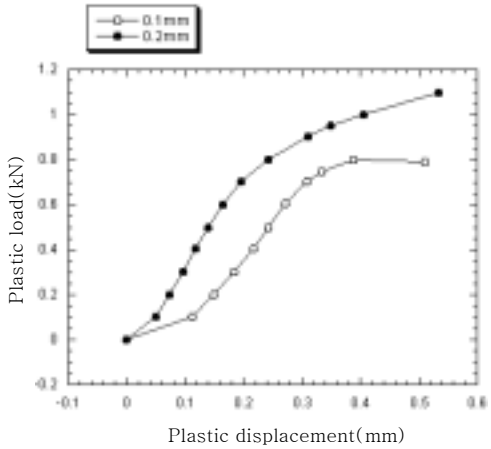

Fig. 5 Comparison of the plastic load vs. the displacement of DCB specimen (t=0.1, 0.2 mm)

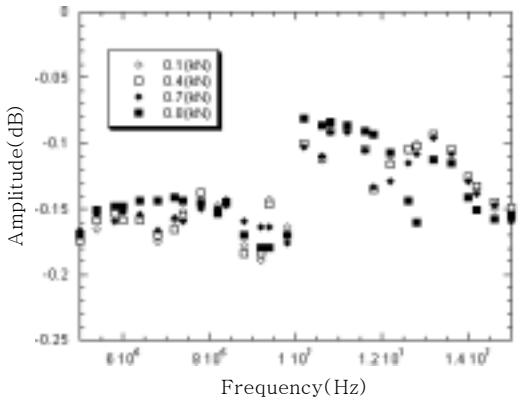

Fig. 6 Comparison of the frequency and the amplitude (t=0.1mm)

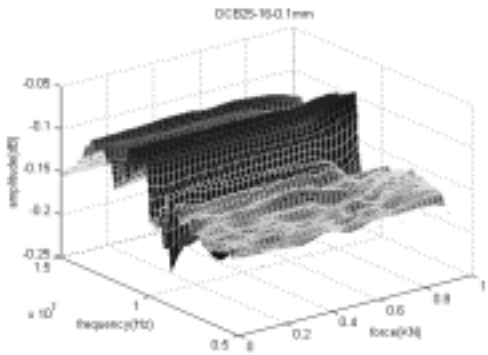

Fig. 7 Correlation distribution of load vs. frequency (t=0.1mm)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

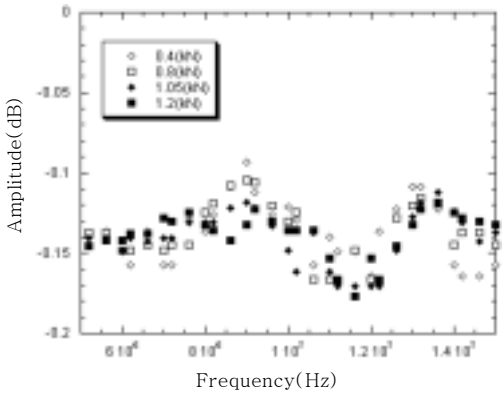

Fig. 8 Comparison of the frequency and the amplitude (t=0.2mm)

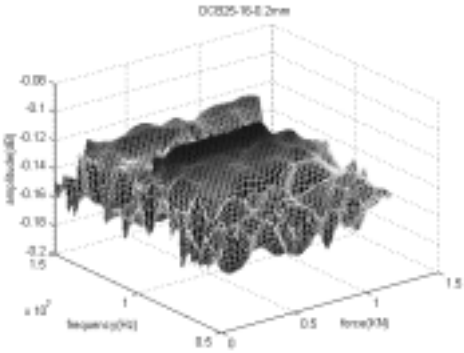

Fig. 9 Correlation distirbution of load vs. frequency(t=0.2mm)

역에서는 약간의 증가를 나타내고 있다. 이것은 접착제의 소성변형에 따라 접착층의 초음파 전파속도, 임피던스, 접착층 두께 등 재료의 초음파 특성이 변하기 때문이라고 생각된다. Fig. 9는 서로 다른 하중에서 초음파 주파수에 따르는 변화 특성을 나타낸 것이다. 여기에서도 Fig. 7에서와 마찬가지로 8MHz-13MHz사이에서 신호가 비교적 큰 파동이 나타나고 있음을 확인 할 수 있었다. 그러므로 이러한 접착면의 파괴를 예측하는데 8MHz-13MHz사이를 고찰구간으로 하는 것이 알맞다고 생각된다.

4.3 J-적분에 의한 탄소성 영역의 분석

Fig. 10은 하중변화에 따른 J-적분의 값을 나타내고 있다. 여기서 관찰 할 수 있듯이 접착층 두께가 0.1mm에서는 0.2mm에서 보다 J-적분 값이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 같은 하중변위에 대하여 0.1mm에서 0.2mm보다 소성구간이 작기 때문에 하중의 변화가 급격히 변하기 때문이라고 생각된다. 또한, 대략 0.15mm 이하의 threshold 구간에 대한 보다 정밀한 측정 및 해석이 앞으로의 과제라 생각된다.

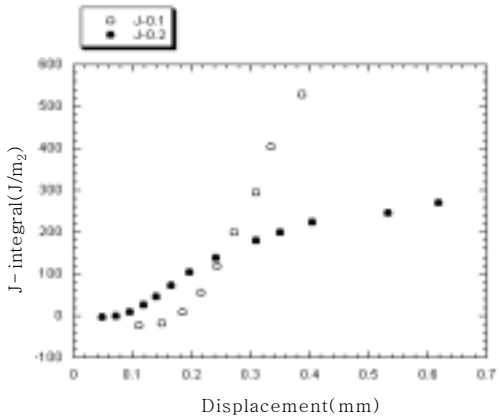

Fig. 10 Comparison of J-Integral vs. Displacement

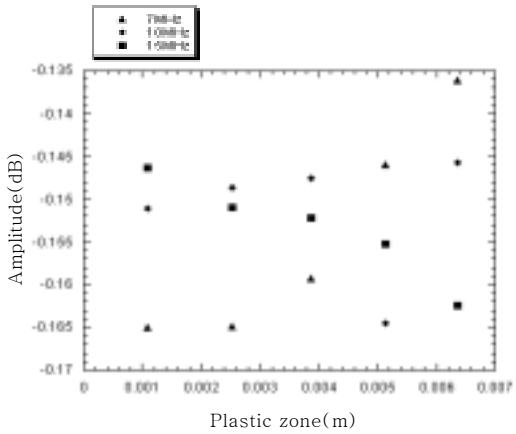

Fig. 11 Comparison of plastic zone vs. amplitude (t=0.1mm)

4.4 탄소성 해석과 초음파 주파수 분석의 비교

Fig. 11과 Fig. 12는 소성구역의 길이와 초음파 신호 특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 접착층 두께가 0.1mm에서는 10MHz에서 초음파 진폭이 증가하고 있지만, 0.2mm에서는 감소하고 있다. 이것은 접

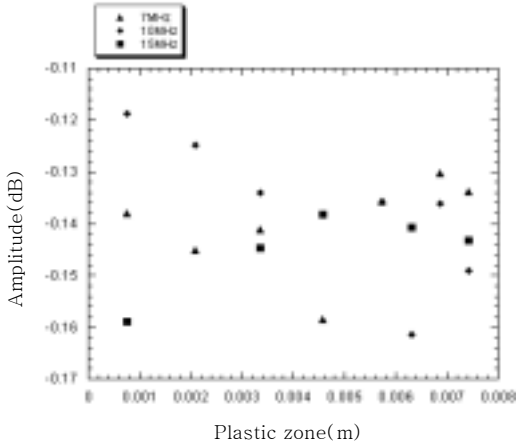

Fig. 12 Comparison of plastic zone vs. amplitude (t=0.2mm)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

착층 두께 및 소성영역의 변동이 주파수에 대한 임피던스에 많은 영향을 미치며, 이러한 파라미터의 영향에 대한 평가가 앞으로의 과제라 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 초음파의 주파수 분석을 통하여 접착접합 이음의 강도에 영향을 미치는 파라미터를 규명하기 위해, Al6061 접착 시험편의 접착층 두께가 0.1mm, 0.2mm에서 작용하는 하중에 따르는 초음파파형 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하중작용에 따른 접착접합 이음의 비선형 구간은 접착층이 두꺼워 지면서 파단강도가 증가함을 확인하였다.

2) 탄성구간에서는 초음파 파형의 신호가 거의 변화가 없었으나, 소성변형이 일어나면서 반사 파형의 진폭이 상당히 증가함을 확인하였다.

3) 소성변형에 따른 주파수 대역의 구간에 따라 초음파신호의 변화가 다르다는 것을 확인하였다.

4) 접착층 두께가 초음파 신호평가에 상당히 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

자동차 차체의 성능을 향상시키기 위하여 구조부재 조립에 있어서 새로운 접합기술인 접착접합 기술을 도입하고 있다. 그러나 접착제에 대한 요구성능 및 채용부위에 대한 여러 가지 불명확한 점이 많다. 따라서 구조접합기술이 자동차 조립공정에 필수 기술로써 장착되기 위해서는 앞으로 활발한 연구를 통한 체계적인 이론 및 기술상의 정립이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 長谷川, 宇佐見 :“自動車用 アルミニウム合金の接着接合”, 日本接着學會誌, 28-10 (1992), 427-435 (in Japanese)
2. 吉田他, :“ウェルドボンド構造の剛性檢討について”, 自動車技術會 シンポジウム 新時代を擔う構造接着技術, ’90 (1991), 151-157 (in Japanese)
3. S.K.Oh, Y.T.Hwang and W.Yi : Quantitative Nondestructive Evaluation of Bonded Joints utilizing Pulse-Echo Ultrasonic Test, Journal of the Korea Society of Precision Engineering, 20-3 (2003)
4. N.Y.Chung, S.G.Kang, and M.D.Lee : Evaluation of Fracture Toughness by Energy Release Rate for Interface Crack in Adhesively Bonded Joints, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 24-9 (2000), 2174-2182
5. S.J.Song, J.U.Choe, and H.J.Kim : A Study on Elastic Wave Propagation for Nondestructive Evaluation of Composite Structures - An Experimental Approach, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 22-6 (1998), 978-989
6. Mostovoy, S. and Ripling, E. J. : Flow tolerance of a number of commercial and experimental adhesives, In Adhesion science and technology, New York: Plenum Press, V.9B (1975), 64-80
7. Yamada, S. E. : Elastic/plastic fracture analysis of bonded joint, Engineering of Fracture Mechanics, V. 27 (1987), 315-328
8. 加藤 寛, 香川新太郎 : Waveform analysis of ultrasonic wave reflected from bonding interface and its application to nondestructive evaluation of bonding strength, 非破壞檢査, 44-12 (1995) (in Japanese)
9. J.P.Kim, C.S.Seok : A study on the evaluation of material degradation of 1Cr-1Mo-0.25V steel using ultrasonic techniques, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, (2001), 2116-2124
10. 根庵勝雄, 高木賢志郎 : 超音波技術, 東京大學出版會, 1989, 151-152 (in Japanese)
11. Niwa, S., : Test method and static strength of steel sheets adhesive joints - Its foundation and application to automotive body, Society of Automotive Engineers of Japan, (1991), 12-19

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.