

음향초음파와 음향방출에 의한 복합재료-금속 접착접합부의 피로손상 평가

Assessment of Fatigue Damage of Adhesively Bonded Composite -Metal Joints by Acousto-Ultrasonics and Acoustic Emission

권오양*, 이경주**

Oh-Yang Kwon* and Kyung-Joo Lee**

초 록 복합재료-금속 접착접합부가 사용 중 반복 하중을 받을 때 발생하는 피로 손상도를 음향초음파(acousto-ultrasonics; AU)법과 음향방출(acoustic emission; AE)법을 이용하여 평가하였다. 피로시험에는 단일겹치기(single-lap) 시험편을 사용하였으며, AU법을 통해 취득한 신호로부터 음향초음파변수(acousto-ultrasonic parameters; AUP)와 피로손상과의 상관관계 곡선을 얻고, AE법에서는 누적 AE events를 통한 피로손상과의 상관관계 곡선을 얻어, AU법과 AE법의 결과를 비교하였다. 이 곡선들은 피로손상에 의한 고분자기지 복합재료의 강성 저하(E/E_0)를 나타내는 곡선과 매우 유사하며, 이를 바탕으로 피로 손상도의 예측과 잔여 수명의 예측이 가능하다. 또한 피로 하중의 초기 단계와 피로손상의 누적에 의해 급격한 변화가 나타나는 단계의 파형과 주파수 성분을 비교하여, 피로 파괴의 마지막 단계에서 나타나는 신호 중에는 본격적인 피로손상에 의해 발생하는 AE 신호 성분이 포함되어 있음을 확인할 수 있었다.

주요용어: 음향초음파, 음향방출, 복합재료-금속 접합, 접착접합부, 피로손상, 손상지수

Abstract: A correlation between fatigue damage and acousto-ultrasonic (AU) parameters has been obtained from signals acquired during fatigue loading of the single-lap joints of a carbon-fiber reinforced plastic (CFRP) laminates and an Al6061 plate. The correlation showed an analogy to those representing the stiffness reduction (E/E_0) of polymer matrix composites by the accumulation of fatigue damage. This has been attributed to the transmission characteristics of acoustic wave energy through bonded joints with delamination-type defects and their influence on the change of spectral content of AU signals. Another correlation between fatigue cycles and the spectral magnitude of acoustic emission (AE) signals has also been found during the final stage of fatigue loading. Both AU and AE can be applied almost in real-time to monitor the evolution of damage during fatigue loading.

Keywords: acousto-ultrasonics, acoustic emission, CFRP-Al6061 joints, adhesive bonds, fatigue damage, damage index

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 높은 비강도와 비탄성계수를 가

졌으며 고유한 감쇠 특성 때문에 항공 우주 구조, 자동차, 로봇 팔 및 동작기계 등에 그 용도가 늘어나고 있다. 다만 실제로 복합재료를 기계 구조에 사용할 경우 필연적

으로 금속과 연결하게 되며, 따라서 금속과 복합재료 접합부의 설계와 제작은 매우 중요한 문제이다. 어떤 접합 방법이 사용될 수 있는지는 접합되는 재료에 따라 거의 결정되지만, 복합재료 구조물의 접합 방식에는 크게 기계적 접합과 접착 접합의 두 가지가 있다. 기계적인 접합은 피접합물을 파괴하지 않은 상태로 보수나 부속품을 대치하기 위하여 쉽고 빠르게 분해할 수 있고 표면처리가 거의 필요 없으며, 접합부의 품질을 검사하기 쉽다. 그러나 피접합물에 구멍을 가공하여야 하므로, 연속된 섬유를 끊거나 하여 복합재료의 강도를 저하시키며, 접합부 주위에 높은 응력집중 현상을 발생시켜 이로 인한 피접합물의 파괴를 가져올 수 있으며, 구조물의 무게를 증가시키는 문제점을 가지고 있다.

접착 접합은 기계적 접합에 비해 넓은 면적에 하중을 고루 분산시키고, 구조 요소에 볼트나 리벳을 위한 구멍을 낼 필요가 없고, 구조에 추가적인 하중을 더하지 않으며 피로 저항성도 우수하다. 그러나 접착 접합부는 피접합부의 표면처리가 까다롭고 제작된 접합부에 대해서는 사용 중에 품질관리나 성능 평가가 어렵다. 따라서 사실상 분해할 수 없는 복합재료 접착 접합부의 성능 평가는 있는 그대로의 조건하에서 이루어져야 하는데 이를 위해서는 비파괴적 평가방법이 필요하므로 외국에서는 이에 관한 연구가 다수 보고된 바 있다[1-3].

접착 접합부의 성능 평가를 위한 비파괴시험 방법으로는 동전두드리기(coin tapping)로부터 초음파, 음향방출(AE), 홀로그래피(holography), 방사선 투과(radiography), 열화상(thermography), 자기공명영상(MRI)에 이르기까지 다양한 방법이 알려져 있다. 이 중에서 A. Vary 등에 의해 발전된 음향초음파(AU)법은 초음파 신호를 주입하고 AE 신호를 탐지하여 분석함으로써, 송신센서와 수신센서 사이의 재료나 구조가 갖는 결함이나 손상 등의 정보를 파악하는 방법으로, 접합부의 평가에 적용하여 두 센서 사이에 놓인 접합부의 상세한 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다[3]. 즉, AU법은 기존의 AE법과 초음파법에서의 장점을 조합한 기술로서 시편 한쪽에 초음파 센서를 위치시키고 전달 매질을 통해 초음파를 주입하면 이 자극에 의해 재료 내에 응력파의 전파를 일으키게 되는데 이와 같이 전파되는 응력파는 다른 한쪽에 위치한 AE 센서에 의해 탐지된다. 수신된 응력파는 초음파 센서와 AE 센서 사이에 놓인 소재의 미세구조, 손상, 결함과의 상호작용의 결과를 포함하고 있으므로, 초음파 센서와 AE 센서 사이에 놓인 접합부에 대한 성능 평가에 효과

적인 것으로 알려져 있다[4-6].

AU법에서 전통적으로 사용된 신호 분석법은 응력파지수(stress wave factor: SWF) 분석이다. SWF를 정의하는 방법은 여러 가지가 있으나 SWF가 파동 에너지의 전달효율을 측정한다는 원리는 공통이며, 이에 관하여 다수의 연구가 있었다[3,7]. 한편 AU 신호의 파워스펙트럼 밀도를 통계적 의미를 갖는 방식으로 분석하는 또 다른 SWF가 정의되었는데, AUP로 널리 알려진 이 방법을 사용하면 접착접합부의 성능이나 적층 복합재의 손상을 매우 잘 평가할 수 있다고 알려져 있다[6,8].

본 연구에서는 AU법을 적용하여 실험적으로 측정된 파형 데이터로부터 AUP를 계산하여 피로시험이 진행되는 과정에서 접합부에 발생하는 결함의 누적에 따른 Amplitude와 AUP²의 변화를 정량화하고, AE법에 의해서 얻은 결과와 비교함으로써 복합재료-금속 접착접합부 피로손상의 평가 및 잔여 수명에 대한 예측에 활용할 수 있음을 보였다. 피로손상의 정도는 또한 접착 접합부의 계면분리(delamination)상태를 2차원 영상화할 수 있는 초음파 C-scan을 이용하여 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1. n차 모멘트(M_n)와 AUP

AU법을 이용하여 얻어진 신호에 Fast-Fourier Transform(FFT)을 수행하여 주파수 스펙트럼을 얻게 되는데 이렇게 수행된 FFT 데이터로부터 파워스펙트럼 모멘트를 계산하게 된다.

$$M_n = \int_0^{f_N} W(f) f^{ndf} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 f_N은 Nyquist 주파수로 f_N=(1/2Δt)이며, W(f)는 파워스펙트럼 밀도 함수(power spectral density function), n은 정수이다. 실제 디지털 영역(digital domain)에서의 적분은 누적(summation)항으로 바뀌고 M_n은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_n = \sum_{k=0}^{N/2} \frac{(W_{k+1} + W_k)}{2} (k + \frac{1}{2})^n \Delta f^{n+1} \dots (2)$$

여기서, Δf=(1/NΔt)로 정의되는 주파수 분해능이고, Δt는 샘플링 간격, N은 데이터 개수이다. 예를 들어, 0차

모멘트(M_0)는 다음과 같다[9].

$$M_0 = \sum_{k=0}^{N/2} \frac{(W_{k+1} + W_k)}{2} \Delta f \dots\dots\dots (3)$$

M_0 는 파워 스펙트럼 밀도 곡선의 아랫부분의 면적을 의미하며, 이는 전달되는 에너지의 총량을 의미한다[8,10]. 또한 1차 모멘트(M_1)는 각 주파수에 대한 파워스펙트럼 밀도의 총합을 의미한다. 그리고 2차 모멘트(M_2)는 파워 스펙트럼 밀도함수의 분산을 나타내고, 3차 모멘트(M_3)는 파워스펙트럼 밀도함수의 왜도(skewness)를, 4차 모멘트(M_4)는 파워 스펙트럼 밀도함수의 편평도(kurtosis)에 관계한다.

이러한 이론을 AU실험에 적용함에 있어서, M_0 를 AUP1으로 정의하면, 이는 받은 신호 에너지의 총량을 의미하게 되며, AUP2는 M_1/M_0 로 정의하고 이것은 파워 스펙트럼 밀도 곡선의 중심과 관계 있는 것으로 물리적으로는 에너지의 양에 관계하는 신호의 중심 주파수를 나타내는 것이다. 즉 더 큰 AUP2를 가지는 신호는 비례적으로 고 주파수에 더 많은 에너지가 전달된 것을 의미하는 것으로 주파수에 대한 스펙트럼 밀도함수의 산술 평균을 의미한다[10]. 아울러 가장 단순하면서도 분명한 물리적 의미를 갖는 최대 진폭(amplitude)을 AUP0으로 정의하였다.

2.2. 정규화된 상관관계 계수 (I_{dAE})

AE event는 기준 문턱값(threshold)을 넘는 탄성과 신호이며, 본 연구에서는 피로 사이클에 따라 발생하는 누적 AE events 곡선으로부터 접합부의 손상 정도를 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, 피로 손상도에 따른 AUP의 변화에 대응하는 AE 신호의 변화와의 관계를 알아보기 위하여 누적 AE events 데이터로부터 정규화된 손상지수(I_{dAE} , normalized damage index)를 다음과 같이 정의하였다.

$$I_{dAE} = \left(\frac{N_{total} - \sum_{i=0}^n N_i}{N_{total}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 N_{total} 은 총 누적 AE events이고 N_i 는 피로 하중에 의해 발생하는 i번째 AE event이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 시편의 제작

본 연구에서 사용된 복합재료 적층판은 SK케미컬의 UN125B 프리프레그를 이용하여 일방향(unidirectional)으로 8층 적층한 후 오토클레이브(autoclave)에서 경화시켜 제작하였다. 제작된 두께 1mm의 CFRP 적층판과 두께 2mm의 Al6061 판재를 4"×1"의 크기로 가공한 후 표면처리하고 세척하였다. 다음에 Fig. 1과 같이 1"×1"의 접착부를 갖는 단일접합기(single-lap) 시편을 제작하였는데, 사용된 접착제(9923 IPCO National)의 점성이 가장 낮아지는 80℃의 온도에서 진공상태로 하여 오토클레이브에서 3시간 동안 경화시켰다.

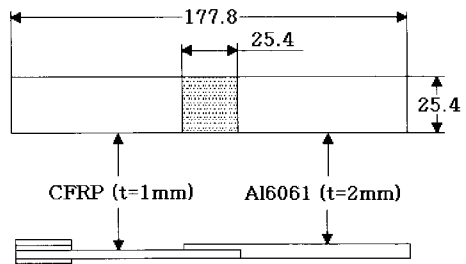


Fig. 1 Dimension and shape of specimen

3.2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 피로시험을 위해 사용한 시험기는 10톤 용량의 서보 유압 재료 시험기(Instron 1342)이며, 반복 하중 주파수는 4Hz로 하였고 하중 조건은 일정진폭 하중인 사인(sinc)파를 사용하였다. 최대 하중은 인장시험으로부터 얻어진 극한 하중값의 15%를 사용하였으며 응력비는 R=0.1로 일정하게 유지하였다.

AU법에서 입력 초음파 신호는 선행 연구의 결과로부터 650kHz의 펄스 신호를 사용했을 때 가장 효과적인 것으로 나타났으므로, 이를 입력신호로 정하였다[11]. 시편에 주입된 초음파 펄스는 Gage Applied Science사의 CompuGen 840 임의파형발생기(arbitrary waveform generator)에서 생성된 신호를 Krohn-Hite사의 대역통과 필터로 필터링한 다음 ENI사의 ENI-240L 광대역 증폭기(broadband amplifier)를 이용하여 50dB로 증폭하여 사용하였다. 650kHz 초음파 펄스의 송신에 사용된 초음파 센서는

Technomic사의 C-0006-GP로 중심주파수 0.5MHz에 지름 0.75"이다. 수신측에서는 Physical Acoustics사의 AE 센서를 이용하여 파형을 획득하고, 대역통과 필터(0.1~1.2MHz)가 내장된 1220A 전치증폭기(pre-amplifier)를 통해 증폭한 다음 기록된 파형은 주로 Mistras-2001 AE DSP의 기능을 사용하여 분석하였다.(Fig. 2 (a))

AE법에서는 두 개의 AE 센서 사이에 접착접합부를 위치시킴으로써 도달시간차(TOF; time-of-flight) 필터링

을 활용하여 피로시험기의 지그(jig)를 통해 들어오는 잡음 신호를 제거, 접착접합부에서 발생하는 신호만을 획득하도록 하였다(Fig. 2(b)). 디지털 파형의 기록에는 8MHz의 샘플링 주파수를 사용하였으며 데이터의 수는 1024, 기록된 파형의 길이는 128 μ s이다.

또한, 피로손상에 의해서 접착접합부에 발생한 계면분리의 정도를 알아보기 위해서 Physical Acoustics사의 10MHz 탐촉자를 사용한 초음파 C-scan(UltraPac II)을 이용하였다.

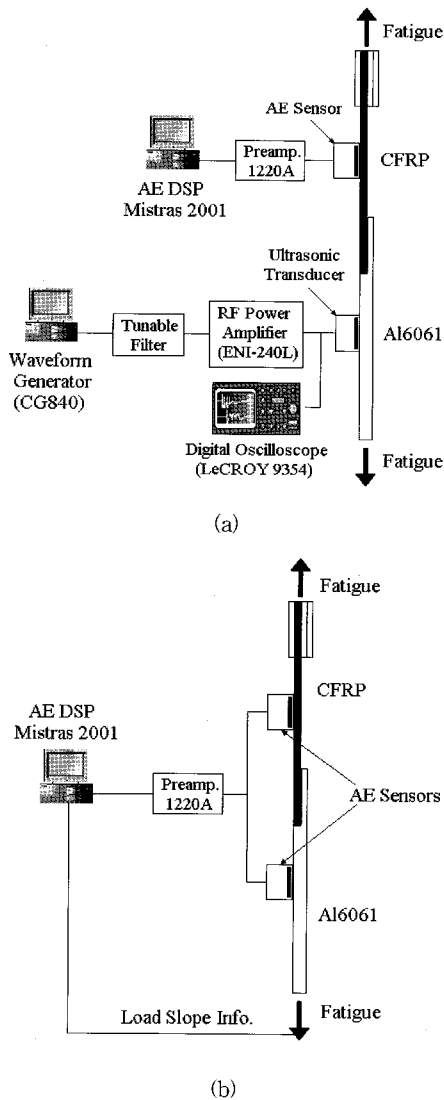


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up for (a) AU- and (b) AE-measurements

4. 결과 및 고찰

4.1. 피로 손상도 곡선과 피로 수명 예측

Fig. 3은 반복 하중에 의해 접합부에 피로손상이 발생하여 누적됨에 따라서 접합부의 일부가 분리되어 초음파 에너지를 전달하는 효율이 떨어졌음을 보여주는 AUP 데이터이다. 그림은 피로 사이클에 따른 AUP0 및 AUP2의 변화를 보여준다. 선행 연구에서 단일 접치기 시편의 경우 AUP0 및 AUP2를 기준 변수로 취할 때 피로 하중에 의한 손상 누적을 가장 잘 평가할 수 있음을 밝혔다[12]. 그림에서 실선으로 나타낸 곡선은 실험에서 얻어진 데이터로부터 수치해적인 방법(polynomial fit; 5th-order curve fitting)에 의한 것이다. AUP0 vs. Fatigue Cycles에서는 약 300,000 사이클까지 일정한 수준을 유지하고, AUP2 vs. Fatigue Cycles에서는 약 250,000 사이클까지 일정한 수준을 유지하다가 감소의 경향이 두드러진 것을 볼 수가 있는데, 이것은 접합부에서 피로 하중에 따른 손상의 누적이 계속되다가 일정 수준에 도달하면 손상의 누적이 더 이상 견디지 못하고 접착 계면에 서서히 분리가 발생되는 것을 의미한다[13].

위 그림에서 실선의 형태는 고분자 기지 복합재료에서 피로손상을 나타내는 지표가 되는 강성저하(E/E_0) 곡선과 매우 유사한 형태를 보이고 있다[14]. 즉 피로 하중을 받는 초기는 급격한 감소를 보이나 이후 피로수명의 70% 이상까지는 커다란 변화를 보이지 않다가 전체 피로수명의 약 75%에서부터 현저한 감소를 나타낸다. 초기에 나타나는 감소는 미세균열의 형성과 관련이 있는 것으로 알려져 있으며, 후기의 현저한 감소는 피로 하중에 의해 접합 계면의 분리가 확대됨에 따라 계면을 통해 전파되는 신호의 감쇠로 인한 진폭의 감소가 원인이며, 계면의 분리

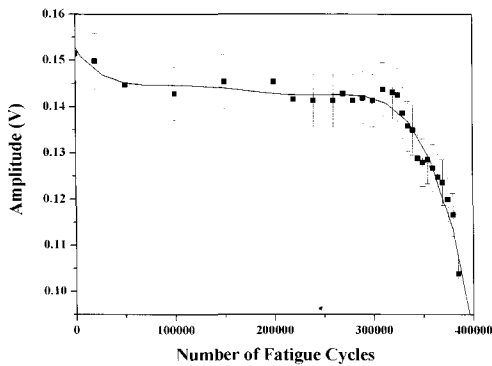
에 의해 감쇠 효과가 더욱 현저한 고주파수 성분이 저주파수 영역으로의 이동하는 것을 보여주는 AUP2 곡선도 피로손상에 의한 변화를 나타낸다. 이 곡선들의 후반기에서 현저한 감소가 나타나는 사실로부터 잔여 수명의 예측에 활용할 수 있음을 밝혔다[12].

Fig. 4는 AE법에 의한 누적 AE events와 이로부터 구한 정규화된 손상지수(I_{dAE})를 나타내는 그림이다. 위에서 고려한 AUP의 변화와 비교해 보면, 피로시험 초기에 나타나는 AE 신호는 미세균열의 형성으로 인해 발생한다고 생각할 수 있으며, 약 330,000 사이클 이후 누적된 피로 하중에 의해 발생하는 AE 신호는 계면의 분리가 시작, 확대됨에 따른 것으로 믿어진다. Fig. 4(b)에 나

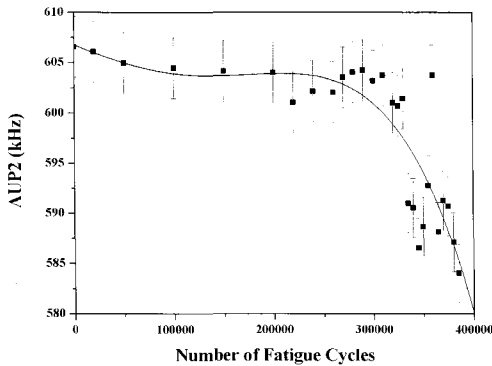
타낸 정규화된 손상지수 곡선은 Fig. 3의 AUP0 및 AUP2 곡선과 매우 유사한 변화를 보여주며, 약 330,000 사이클 이후에 나타나는 지수의 감소를 통해서도 피로손상의 정도와 잔여 수명의 예측을 가능하게 할 것이다.

4.2. AU법과 AE법의 신호 분석

AU법에서는 피로시험을 행하면서 일정한 시간 간격으로 초음파 센서를 통해 650kHz 신호를 주입하여 Fig. 5의 결과를 얻었다. Fig. 5(a)는 피로시험 시작 직후의 파형과 주파수 분석 결과를 보여주며, Fig. 5(b)는 피로시험이 끝나갈 무렵인 약 385,000 사이클에서의 파형과 주파

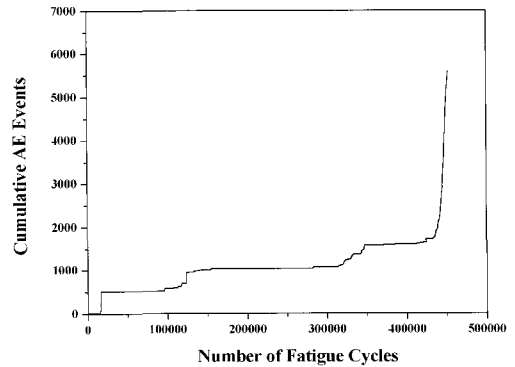


(a)

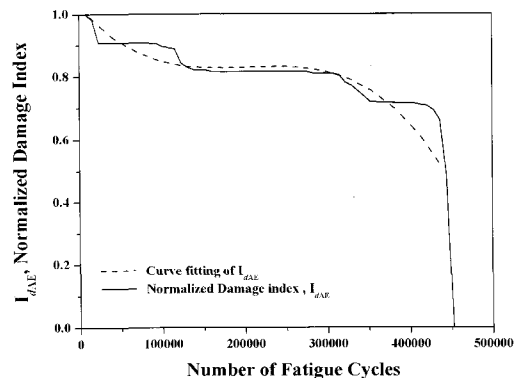


(b)

Fig. 3 Effect of fatigue damage at the composite-metal interface on (a) AUP0 (Amplitude) and (b) AUP2



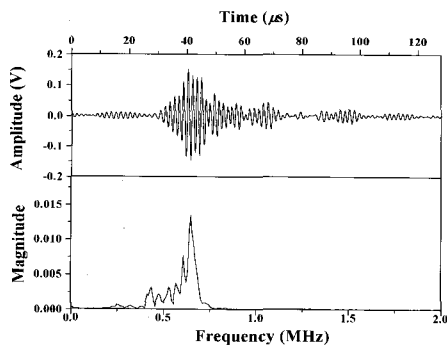
(a)



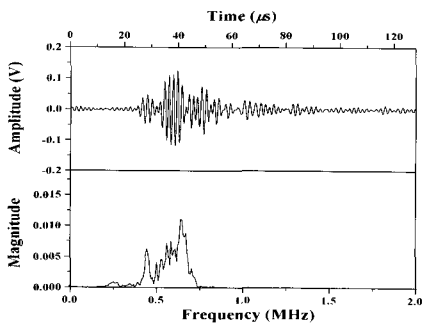
(b)

Fig. 4 Effect of fatigue damage of the bonded joints on (a) cumulative AE events and (b) normalized damage index (I_{dAE})

수 분석의 결과를 나타내고 있다. 시험을 시작한 직후에 나타나는 신호와 시험이 끝나 갈 무렵에 받은 신호와의 사이에는 파형의 최대 진폭이 약 33%정도, 650kHz에서의 파폭이 약 27%정도 감소된 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 시험이 진행되면서 접합부에 피로손상이 발생되어 접합부를 통과하는 초음파의 손실에 기인하는 것으로 접합부가 반복 하중을 받음으로써 어떤 형태로든 손상이 누적되었다는 것을 의미한다. 시험 시작 직후에는 입력된 650kHz의 중심 주파수를 나타내나 시험이 끝나 갈 무렵인 약 385,000 사이클 이후에는 피로 하중의 누적에 의해 접촉접합 계면의 손상으로 650kHz의 성분의 크기가 27% 정도 감소한 대신 400kHz대의 주파수 성분이 증가하였는데, 이는 피로손상이 누적됨으로 인해 접합계면에서 AE 신호가 발생하게 되고, 이 미세한 신호에 의해 400kHz대의 주파수 성분이 증가하는 것으로 생각된다.



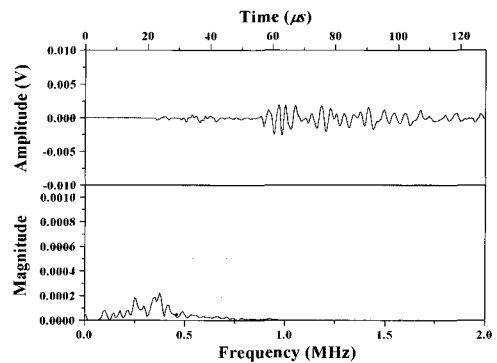
(a)



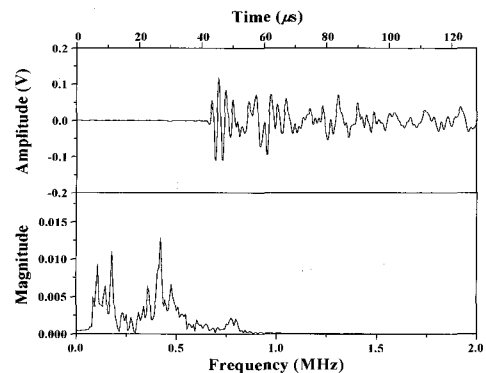
(b)

Fig. 5 Waveforms and power spectra of AU signals detected during the fatigue test; (a) initial stage and (b) final stage

피로시험 중에 AE법으로 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 시험 시작 직후의 측정된 파형과 주파수 분석 결과를 보여주며, Fig. 6(b)는 시험이 끝나갈 무렵인 약 361,000 사이클에서의 파형과 주파수 분석 결과를 보여주고 있다. 피로손상이 누적됨에 따라 파형의 진폭이 현저히 커지며, AU 실험 결과에서 언급한 400kHz대 성분의 신호가 발생되는 것을 볼 수 있다. 이것은 AU법이 초음파 센서에 의해 입력된 신호가 접합부의 손상도에 의해 변화되어 AE 센서에 전달된 것을 의미하지만, 본 연구에서처럼 피로 하중이 계속되는 동안 실시간 측정이 이루어지는 경우 접촉접합 계면에서 나오는 매우 작은 크기의 AE 신호 또한 피로손상의 정도를 모니터링 하는데 무시할 수 없는 것임을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 6 Waveforms and power spectra of AE signals detected during the fatigue test; (a) initial stage and (b) final stage

4.3. AUP와 AE의 관계

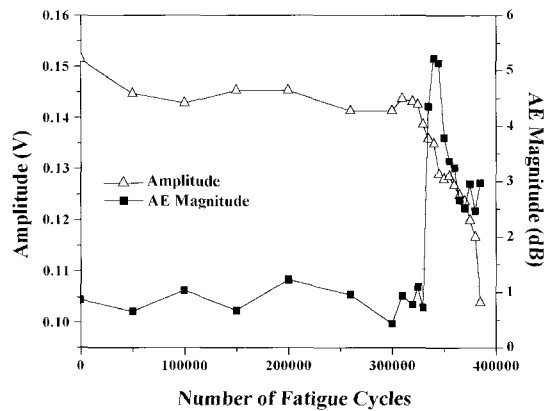
AU법에 의해 측정된 신호에는 측정 방법의 특성상 수 신측에서 입력된 초음파 신호 외에도 재료 내부의 손상에 의해 발생하는 AE 신호가 내재되어 있다. 이를 확인하기 위하여 AU법에 의해 측정된 신호로부터 피로손상에 의해 접합부에서 발생하는 400kHz대의 AE 신호 성분의 변화를 구하고 AUP의 변화와 비교하였다. 피로 하중이 걸려 있는 중에 측정된 AU 신호에 350~450kHz의 대역통과 필터링을 행하여 400kHz대 성분만을 주로 포함하는 신호를 획득하고, 계산한 AUP의 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에서는 650kHz 신호의 진폭과 발생한 400kHz대 신호의 크기를 비교하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 약 330,000 사이클에서 피로손상의 누적에 의해 입력 신호의 진폭이 감소하는 부분에서 AE 신호의 주파수 성분이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)에서 AUP2와 비교한 결과에서도 마찬가지로 약 330,000 사이클에서 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 증가한 AE 신호는 약 350,000 사이클이 지나면서 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 접합부가 330,000 사이클까지 누적된 손상을 더 이상 견디지 못하고 초기 파손이 일어나면서 AE 신호에 해당하는 주파수 성분의 현저한 증가를 가져오는 것이며, 이후 파괴에 이를 때까지는 파손의 진전에 의해 AE의 발생이 오히려 둔화되기 때문이다.

이러한 결과들은 파괴강도에 비해 훨씬 낮은 수준의 피로 하중이 걸리는 경우 접착 접합 계면의 건전성 한계와 잔여 피로수명의 예측에 활용할 수 있을 것이다. 하지만 AE 센서가 짐승 신호에 노출될 가능성이 항상 존재하고, 접합계면의 상태 조건이나 가해지는 하중의 방향성에 의한 여러 오차가 발생할 확률도 있으므로, AE 신호의 짐승제거 기술과 FEM 등에 의한 하중 조건의 계산 등의 연구도 병행되어야 할 것이다.

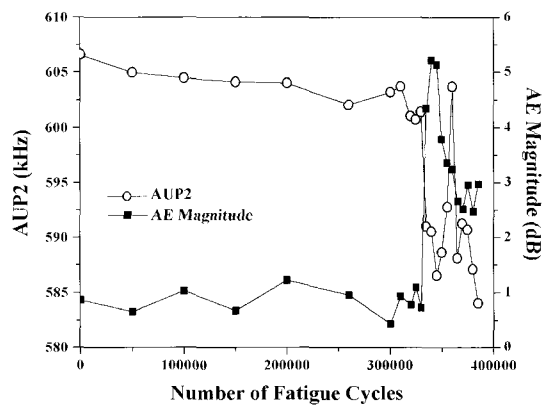
4.4. 초음파 C-scan에 의한 접합부 손상 평가

하중을 가하지 않은 접합부와 피로 하중에 의한 손상의 누적을 AE 신호를 통해 모니터링하여 단계별로 접착면이 완전 분리되지 않을 때까지의 접합부 4가지를 초음파 C-scan을 통해 Fig. 8과 같이 2차원 영상화하였다. 흰 부분이 접착되어 있음을 나타내며, 어두워질수록 계면이 분리되어 있음을 의미한다. Fig. 8(a)

는 피로 하중을 가하지 않은 접합부의 상태를 보여주며, Fig. 8의 (b)는 약 40,000 사이클, (c)는 약 300,000 사이클, (d)는 약 400,000 사이클, (e)는 약 425,000 사이클의 피로 하중을 받은 접합부의 상태를 보여준다. 앞에서 본 AU법과 AE법에 의한 신호분석의 결과에서 약 300,000 사이클 정도까지의 피로손상은 신호에 변화가 거의 없었고, 이는 Fig. 8의 (a), (b), (c)의 그림으로 확인할 수 있다. 이후 피로손상의 누적을 Fig. 8의 (d)와 (e)에서 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of AUP with AE magnitude in the AU measurement; (a) AUP0 (Amplitude) vs. AE magnitude and (b) AUP2 vs. AE magnitude

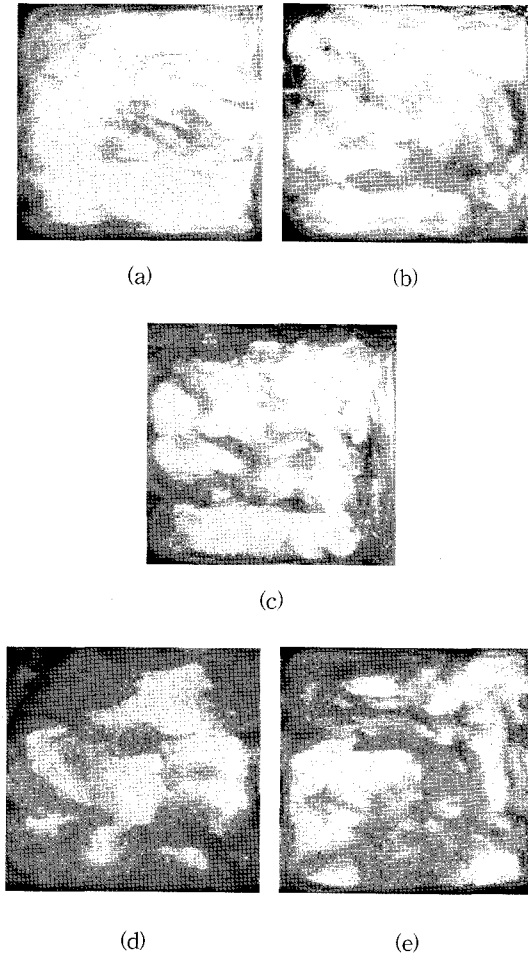


Fig. 8 Ultrasonic C-scan images to evaluate the fatigue damage of an adhesively bonded joints: (a) unfatigued, (b) about 40,000 cycles, (c) about 300,000 cycles, (d) about 400,000 cycles, and (e) about 425,000 cycles fatigued

5. 결 론

AU법에 의해 측정된 파형 데이터로부터 AUP를 측정하여 피로손상의 누적에 따른 AUP0 및 AUP2의 변화를 정규화된 곡선을 구하고, AE법에 의해서 측정된 신호로부터 정규화된 손상지수(I_{dAE})를 제안하여 복합재료-금속 접착접합부의 피로손상 누적에 대한 평가와 잔여 수명의 예측이 가능함을 밝혔으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AU법에 의해서는 Amplitude를 포함한 AUP를 구함으로써 접합부의 에너지 전달 효율로 나타나는 접합계면의 피로 손상도와 잔여 수명을 알 수 있으며, 수신된 신호의 주파수 분석을 통해 피로 하중에 의한 계면의 손상에서 발생하는 신호의 특성을 알 수 있다.
2. AU 데이터로부터 구한 AUP0 곡선에서는 약 300,000 사이클까지, AUP2 곡선에서는 약 250,000 사이클까지 변화를 보이지 않았고, AE 측정의 결과로부터 제안한 정규화된 손상지수 곡선에서는 약 330,000 사이클까지 거의 일정한 값을 나타내었다. 이는 전체 사이클의 약 70~75%에 해당되는 것으로 접착접합부의 손상도와 잔여 수명의 예측에 활용할 수 있다.
3. AU 신호 분석의 결과 피로 하중에 의해 손상을 받은 후 파형의 최대 진폭이 33% 정도, 650kHz에서의 파워가 약 27%정도 감소하였으며, 그 대신 피로손상에 의해 접합계면에서 발생한 신호인 400kHz대의 주파수 성분이 약 27% 증가한 것을 볼 수 있다.
4. AE법에 의해 측정된 파형과 주파수 분석을 통해 피로 하중에 의해 접착접합 계면이 손상을 받을 때 중심주파수 400kHz대의 성분이 발생하는 것을 확인함으로써 AU법으로 측정된 신호에는 입력된 초음파 신호뿐만 아니라 접합부에서 피로손상 누적에 의해 발생하는 AE 신호의 성분 또한 포함되어 있음을 확인하였다.
5. 초음파 C-scan을 통해 접합부를 2차원 영상화하였으며, 이 결과로부터 AU법과 AE법을 사용하여 제안된 피로손상의 예측이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-04-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] G. B. Chapman, Jr., "A nondestructive method of evaluating adhesive bond strength in fiberglass reinforced plastic assemblies," *Joining of Composite Materials*, ASTM STP 749, K. T. Edward, Ed., American Society for Testing and Materials, pp. 32-60, (1981)

- [2] H. Aglan, L. Kennebrew, D. Hsu, and T. Patton, "Correlation of NDE parameters with fatigue lifetime of aircraft adhesive bonds," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 1611-1618, (1992)
- [3] A. Vary, "Acousto-ultrasonics: retrospective exhortation with bibliography," *Materials Evaluation*, Vol. 49, pp. 581-591, (1991)
- [4] A. Fahr, S. Lee, S. Tanary, and Y. Haddad, "Estimation of strength in adhesively bonded steel specimens by acousto-ultrasonic technique," *Materials Evaluation*, Vol. 47, pp. 233-240, (1989)
- [5] A. Tiwari and E. G. Henneke, Jr., "Real-time acousto-ultrasonic NDE technique to monitor damage in SiC/CAS ceramic composites subjected to dynamic loads," ASTM STP 1184, M.R. Mitchell and O. Buck, Eds., ASTM, Philadelphia, PA, pp. 363-375, (1994)
- [6] J. C. Duke, Jr., "Acousto-ultrasonics," Ch. 13 of *Nondestructive Testing Technique*, Don E. Bray and Don McBride, Eds., John Wiley & Sons, Inc., pp. 379-397, (1992)
- [7] T. F. Drouillard and A. Vary, "AE literature - acousto-ultrasonics," *J. of Acoustic Emission*, Vol. 12, No. 1/2, pp. 79-100, (1994)
- [8] M. T. Kiernan and J. C. Duke, Jr., "PC analysis of an acousto-ultrasonic signal," *Materials Evaluation*, Vol. 47, pp. 1344-1352, (1988)
- [9] G. E. Hearn and A. V. Metcalfe, "Spectral analysis in engineering: concepts and cases," Arnold, London, (1995)
- [10] P. A. Dickstein, S. Girshovich, Y. Sternberg, A. N. Sinclair and H. Leibovitch, "Ultrasonic featured-based classification of the interfacial condition in composite adhesive joints," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 2, pp. 207-224, (1990)
- [11] O. Y. Kwon and S. H. Lee, "Acousto-ultrasonic evaluation of adhesively bonded CFRP-aluminum joints," *NDT&E International*, Vol. 32, pp. 153-160, (1999)
- [12] 권오양, 김태현, "복합재료-금속 접착접합부의 피로 손상 실시간 평가기법," *비파괴검사학회지*, 제19권 제6호, pp. 439-447, (1999)
- [13] 이종오, 이주석, 윤운하, 이승희, "음향방출시험에 의한 복합재료 접합부의 비파괴평가," *비파괴검사학회지*, 제16권 제2호, pp. 79-85, (1996)
- [14] R. D. Jamison, K. Schulte, K. L. Reifsnider, and W. W. Stinchcomb, "Effect of defects in composite materials," ASTM STP 836, pp. 21-55, (1984)