

## 복합재료-금속 접착접합부의 피로손상의 실시간 평가기법 A Real-time Evaluation Technique of Fatigue Damage in Adhesively Bonded Composite-Metal Joints

권오양\*, 김태현\*

Oh-Yang Kwon\* and Tae-Hyun Kim\*

**초 록** 복합재료-금속 접착접합부가 사용 중 반복하중을 받을 때 발생하는 피로손상을 실시간에 평가할 수 있는 기법으로 음향초음파(acousto-ultrasonics; AU)법을 채택하였으며, 피로시험 중의 단일겹치기(single-lap) 및 이중겹치기(double-lap) 평판형 시험편에서 취득한 신호로부터 계산된 음향초음파변수(acousto-ultrasonic parameters; AUP)와 피로손상도 사이의 상관관계를 나타내는 곡선을 얻을 수 있었다. 곡선은 피로손상에 의한 고분자기지 복합재료의 강성을 저하( $E/E_0$ )를 나타내는 곡선과 매우 유사하며, 이를 바탕으로 피로손상도의 실시간 예측이 가능하다. 다만 단일겹치기 시험편의 경우에는 Amplitude와 AUP2를, 이중겹치기 시험편의 경우에는 Amplitude와 AUP1을 기준 변수로 채택할 때 보다 일관성 있는 결과를 얻고 있는 점으로부터 실제 구조물에 적용함에 있어서는 각각의 형상에 따른 최적 변수를 선택하여 활용해야 할 것으로 사료된다.

**Abstract** One of the problems for practical use of fiber-reinforced plastics is the performance degradation by fatigue damage in the joints. The study is to develop a nondestructive technique for real-time evaluation of adhesively bonded composite-metal joints. From the prior study we confirmed that the bonding strength can be estimated from the correlation between the quality of bonded parts and AUP's. We obtained a curve showing the correlation between the degree of fatigue damage and AUP's calculated from signals acquired during fatigue loading of single-lap and double-lap joints of CFRP and Al6061. The curve is an analogy to the one showing stiffness reduction ( $E/E_0$ ) of polymer matrix composites by fatigue damage. From those facts, it is plausible to predict the degree of fatigue damage in real-time. Amplitude and AUP2 appeared to be optimal parameters to provide more reliable results for single-lap joints whereas Amplitude and AUP2 did for double-lap joints. It is recommended to select optimal parameters for different geometries in the application for real structures.

### 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 높은 비강도와 비강성율을 가졌으며 고유한 감쇠특성 때문에 항공우주 구조, 자동차 산업, 로봇 팔 및 공작기계 등에 용도가 늘어나고 있다. 다만 실제로 복합재료를 기계구조에 사용할 경우 필연적으로 금속과 연결되며, 접합부의 설계와 제작은 매우 중요한 문제로 대두된다. 또한 접합된 기계부품들은 일

반적으로 여러 가지 형태의 하중을 반복적으로 받기 때문에 이들을 실물구조에 적용할 때 이런 부재들의 피로 수명을 예측하는 기술이 손상허용설계를 위하여 필수적이다. 어떤 접합방법이 사용될 수 있는지는 접합되는 재료에 따라 거의 결정되는데, 접합방식은 크게 기계적 접합과 접착접합으로 나눌 수 있다.

기계적 접합에서 설계자는 각 구조물의 특성에 따라 구멍의 갯수 및 크기와 위치를 결정해야 하는데, 복합

재료가 일반재료와 달리 이방성을 지니며 기계적 성질이 다른 보강섬유와 기지재료의 혼합체이기 때문에 구멍주위의 응력분포를 예측하기가 쉽지 않고 구조물의 파괴가 쉽게 일어날 수 있다. 기계적인 접합은 피접합물을 파괴하지 않은 상태로 보수나 부속품을 대치하기 위하여 쉽고 빠르게 분해할 수가 있고 표면처리가 거의 필요 없으며, 접합부의 품질을 검사하기 쉽다. 그러나 피접합물에 구멍을 가공하여야 하므로, 연속된 섬유를 끊거나 복합재료의 강도를 저하시키며, 접합부 주위에 높은 응력집중 현상을 발생시키며 이로 인해서 피접합물의 파괴를 가져올 수 있고, 구조물의 무게를 증가시키며 부식문제를 일으키는 문제점을 가지고 있다.

접착접합은 기계적 접합에 비해 넓은 면적에 하중을 고루 분산시키고, 구조요소에 볼트나 리벳을 위한 구멍을 낼 필요가 없으며 구조에 추가적인 하중을 더하지 않고 피로저항성도 우수하다. 그러나 접착접합부는 피접착부의 표면처리가 까다로우며 제작된 접합부에 대하여 사용 중에 품질관리나 성능평가가 힘들고 사실상 분해할 수 없는 때문에, 복합재료 접착접합부의 성능평가는 있는 그대로의 조건하에서 이루어져야 하며 이를 위해서는 비파괴적 평가방법이 필요하므로 외국에서는 이에 관한 연구가 다수 보고된 바 있다[1-3].

접착접합부의 성능평가를 위한 비파괴 시험법으로는 동전두드리기(coin tapping)로부터 초음파, 음향방출(AE), 홀로그래피(holography), 방사선 투시(radiography), 열화상(thermography), 자기공명영상(MRI)에 이르기까지 다양한 방법이 알려져 있다. 그 중에서도 A. Vary 등에 의해 발전된 AU법은 초음파 신호를 주입하고 AE신호를 탐지하여 분석함으로써, 송신센서와 수신센서 사이의 재료나 구조에 존재하는 결함이나 손상 등의 정보를 파악하는 방법으로써 접합부의 평가에 적용하면, 센서와 센서 사이에 위치한 접합부의 상세한 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다 [3]. 즉, AU법은 기존의 AE법과 초음파법의 장점을 조합한 기술로서 시편 한쪽에 초음파 센서를 위치시키고 전달매질을 통해 초음파를 주입시키면 이 자극에 의해 재료 내를 응력파가 전파하게 되고, 전파된 응력파는 다른 한쪽에 위치시킨 AE센서에 의해 탐지된다. 수신된 응력파는 센서 사이에 놓인 재료의 미세구조, 손상, 결함과의 상호작용의 결과를 포함하고 있으므로, 초음파센서와 AE센서 사이의 접합부에 대한 성능평가에 효과적인 것으로 알려져 있다[4-6].

본 연구에서는 이러한 AU법을 이용하여 복합재료-

금속 접합부를 통과한 후 수신된 응력과 신호의 파형으로부터 AUP를 구하고, 이를 접착접합부에서 발생하는 피로손상의 실시간 평가에 활용할 수 있음을 밝히고자 하였다.

## 2. AUP에 대한 이론적 배경

### 2.1. n차 모멘트( $M_n$ )와 AUP

AU법에서 수신된 응력과 신호의 파형 데이터에서 고속푸리에변환(FFT)을 통해 파워스펙트럼을 얻고, 이 스펙트럼으로부터 AUP를 계산하게 되는데, 이를 위해서는 우선 파워스펙트럼의 모멘트를 다음과 같이 정의한다[7].

$$M_n = \int_0^x W(f) f^n df \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $f_N$ 은 Nyquist 주파수로  $f_N=(1/2\Delta t)$ 이며,  $W(f)$ 는 파워스펙트럼 밀도함수,  $n$ 은 정수이다.

실제로 디지털 데이터의 취급에서 적분은 누적(summation)항으로 이루어지므로  $M_n$ 은 다음과 같이 계산된다.

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

여기서,  $\Delta f=(1/N\Delta t)$ 로 정의되는 주파수 분해능이고,  $\Delta t$ 는 샘플링 간격,  $N$ 은 데이터 갯수이다. 예를 들어, 0차 모멘트( $M_0$ )는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

즉,  $M_0$ 는 파워스펙트럼 밀도곡선의 아랫부분의 면적을 의미하며, 이는 전달되는 에너지의 총량을 의미한다 [7].

또한 1차모멘트( $M_1$ )는 각 주파수에 대한 파워스펙트럼밀도의 총합을 의미하고, 2차모멘트( $M_2$ )는 각 주파수에 대한 파워스펙트럼 밀도함수의 분산을 나타내며, 3차모멘트( $M_3$ )는 파워스펙트럼 밀도함수의 왜도(skewness)에, 4차모멘트( $M_4$ )는 파워스펙트럼 밀도함수의 편평도(kurtosis)에 관계한다[8].

이러한 이론을 AU실험에 적용함에 있어서,  $M_0$ 를 AUP1으로 정의하였는바 이는 받은 신호에너지의 총량을 의미하게 되며, AUP2는  $M_1/M_0$ 로 정의하여 파

위스펙트럼 밀도곡선의 중심을 나타내고 물리적으로는 신호에너지의 양에 관계하는 신호의 중심주파수를 나타낸다. 즉, 더 큰 AUP2를 가지는 신호는 비례적으로 높은 주파수 대역에 더 많은 에너지가 전달됨을 의미하는 것으로 주파수에 대한 스펙트럼 밀도함수의 산술평균에 해당한다(9,10).

### 3. 실험

#### 3.1. 시편의 제작

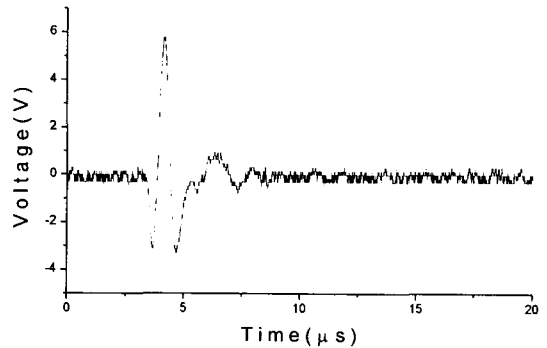
본 연구에서 사용된 복합재료 적층판은 선경인더스트리사의 카본/에폭시 프리프레그(UIN125B)를 이용하여 일방향으로 8층 적층한 후 오토클레이브에서 경화시켜 제작하였다. 제작된 두께 1mm의 CFRP적층판과 두께 2mm의 Al6061판재를 4"×1"의 크기로 절단한 후 표면처리와 세척을 행하였다. Fig. 1과 같이 1"×1"의 접착부위를 갖는 단일접치기 및 이중접치기 시편으로 제작하였는데, 사용된 접착제(9923 IPCO National)의 점성이 가장 작아지는 80℃의 온도에서 진공상태로 하여 3시간 동안 경화시켰다.

#### 3.2. 실험장치 및 방법

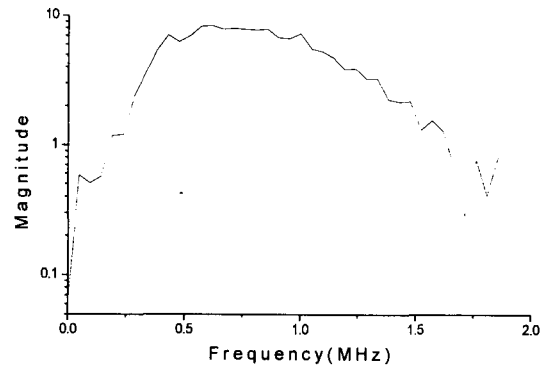
피로시험을 위해 본 시험에 사용한 시험기는 10톤 용량의 서보유압 재료시험기(Instron 1342)이며, 반복하중 주파수는 4Hz로 하였고 하중조건은 일정진폭하중인 사인(sine)파를 사용하였다. 피로시험의 최대하중은 신호를 획득하는데 지장이 없도록 인장시험으로부터 얻어진 극한하중 값의 15%를 사용하였으며 용력비는

$R=0.1$ 로 일정하게 유지하였다.

초음파 입력신호는 선행연구의 결과로부터 650kHz 펄스를 사용했을 때 가장 효과적인 것으로 나



(a) Input signal (650kHz)



(b) Power spectrum of the input signal

Fig. 2 Waveform and power spectrum of the input signal

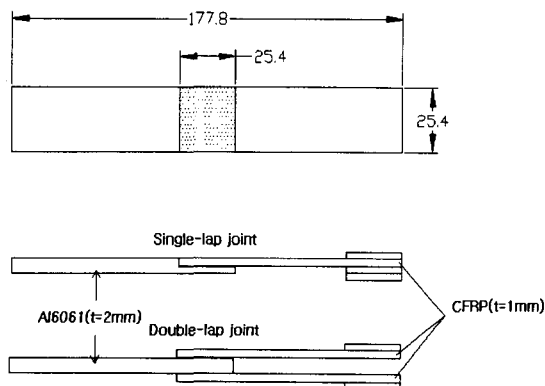


Fig. 1 Dimension and shape of specimens

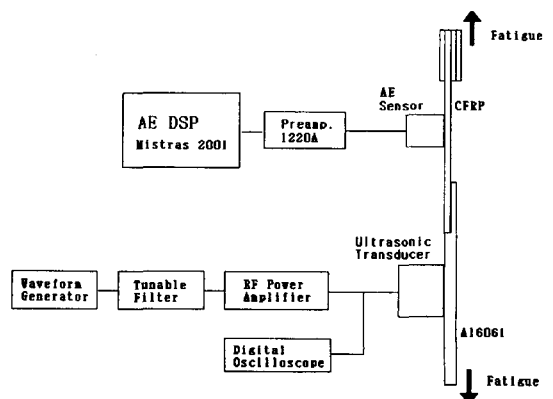


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

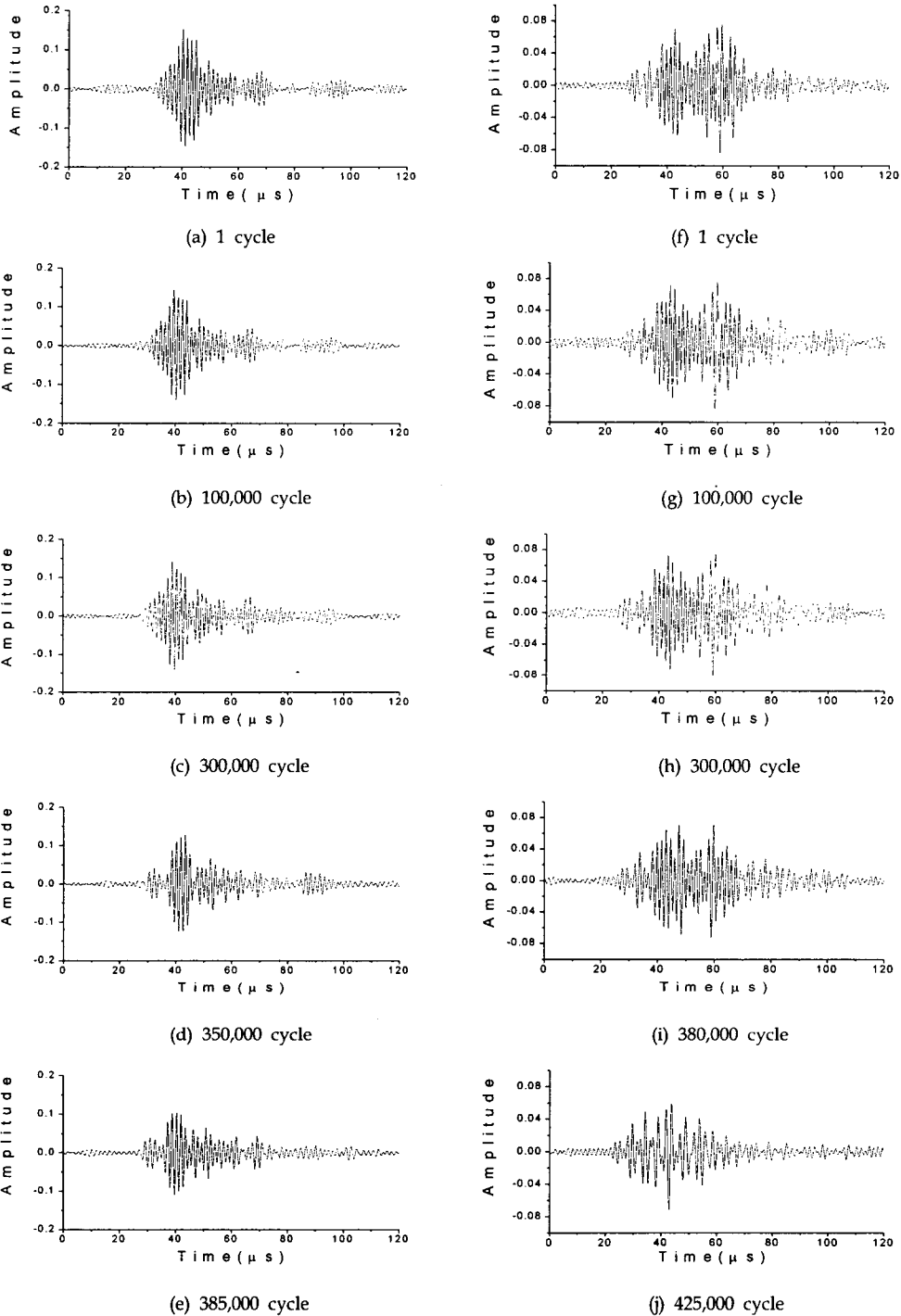


Fig. 4 Series of waveform detected at various stage of the fatigue test: (a)~(e) single-lap joints, (f)~(j) double-lap joints

타났으므로 이를 입력신호로 정하였다[11]. 입력신호의 파형과 스펙트럼은 Fig. 2와 같다. 실험에서 시편에 주입하는 초음파 신호는 Fig. 3에 나타난 바와같이 임의파형발생기(CompuGen 840, Gage Applied Science)에서 합성한 신호를 광대역 증폭기(ENI-240L)로 50dB 증폭하여 사용하였다. 초음파신호의 송신에는 0.5MHz 초음파센서(C-0006-GP, Technisonic)를 사용하였으며, 전파된 신호의 수신에는 압전형 광대역 AE센서(WD, Physical Acoustics)를 이용하였다. 수신된 신호는 100kHz~1.2MHz의 대역통과 필터가 내장된 전치증폭기(1220A, Physical Acoustics)를 통해 증폭하고, 파형기록장치가 포함된 디지털 AE 분석장치(Mistras-2001, Physical Acoustics)로 저장한 다음 AUP를 계산하는 순서로 처리하였다. 디지털 파형의 기록에 사용한 샘플링 주파수는 8MHz, 데이터의 수는 1024이었으므로 기록된 파형의 길이는 128 $\mu$ s이다.

4. 결과 및 고찰

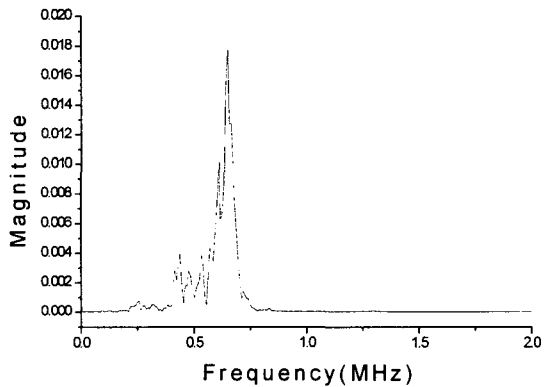
4. 1. 피로손상에 따른 신호분석

피로시험을 행하면서 일정한 시간 간격으로 초음파센서를 통해 650kHz 입력신호를 주입하여 다음과 같은 결과를 얻었다. Fig. 4는 피로시험 중의 각 단계별로 획득한 신호의 파형을 보여주는 그림으로 피로 사이클에 따른 Amplitude의 감소를 보여준다. 단일접합기 시편의 경우 300,000cycle까지는 거의 변화가 없고 350,000cycle 이후 Amplitude의 감소와 함께 파형도 많이 달라짐을 볼 수 있다. 이중접합기 시편에서는 100,000cycle 미만의 초기에 약간의 변화가 나타났지만 이후 380,000cycle에 이르기까지는 거의 변화를 보이지 않았다. 이는 단일접합기 시편과 동일한 하중조건에서 이중접합기 시편의 피로수명이 약 10% 정도 더 길기 때문이다.

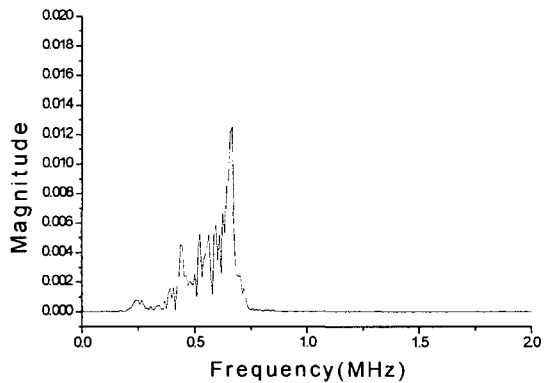
Fig. 5는 단일접합기 시편에서 피로하중의 초기와 말기에서 획득한 신호의 파워스펙트럼을 보여준다. 즉, Fig. 5(a)는 Fig. 4(a)의 파형 데이터로부터, Fig. 5(b)는 Fig. 4(e)의 파형 데이터로부터 FFT하여 얻은 것이다. 손상이 없었던 초기에 비하여 피로손상이 누적된 말기에는 저주파수 영역의 에너지 전파에는 거의 변화가 없으나 650kHz 부근의 고주파수 영역에서 감쇠가 심하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현

상은 이중접합기 시편의 경우에도 Fig. 6에 나타난 바와같이 거의 동일한 경향을 보여준다. 즉, 500kHz 이하의 저주파수 영역보다 650kHz 부근의 고주파수 영역의 감쇠가 현저하게 나타나고 있다. Fig. 6(a)는 Fig. 4(f)의 파형데이터로부터, Fig. 6(b)는 Fig. 4(j)의 파형데이터로부터 FFT하여 얻은 파워스펙트럼이다. 이러한 변화는 반복하중에 의해 접합부에 피로손상이 발생한다기인하는 것으로, 접합부가 반복하중을 받음으로써 여러 가지 형태로 손상이 누적되고, 말기에는 접합부의 일부가 분리되어 초음파 에너지를 전달하는 효율이 떨어졌음을 의미한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 이러한 변화를 좀더 확실히 보여주는데, 각각 단일접합기 시편과 이중접합기 시편에 대



(a) Initial stage (1 cycle)



(b) Final stage (385,000 cycle)

Fig. 5 Power spectra of AU detected signals from the measurements during the initial and the final stages of the fatigue test for single-lap joints

하여 피로 사이클에 따른 Amplitude, AUP1 및 AUP2의 변화를 보여준다. 그림에서 실선으로 나타낸 곡선은 실험적으로 얻은 데이터로부터 통계적인 처리 (curve fitting)에 의해 얻은 것이다. 단일접치기 시편의 경우 약 300,000cycle까지, 이중접치기 시편의 경우 약 340,000cycle까지 초기와 비슷하게 일정한 수준을 유지하다가 어느 시점에 도달하면 그 시점부터 감소의 경향이 두드러지는 것을 볼 수가 있는데, 이것은 접합부가 피로하중에 따른 손상의 누적이 계속되다가 일정수준에 도달하게 되면 손상의 누적에 더 이상 견디지 못하고 서서히 접합면에 분리가 발생하는 것으로 알려져 있다[12]. Fig. 7과 Fig. 8의 결과로부터 단일 접치기 시편에서는 Amplitude와 AUP2를 기준변수로 취할 때, 이중접치기 시편에서는 Amplitude와

AUP1을 기준변수로 취할 때 피로하중에 의한 손상누적을 가장 잘 평가할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 기하학적 형상에 따라 응력파의 전파특성이 달라지기 때문이지만, Amplitude의 감소는 형상에 관계 없이 일관된 경향을 유지하는 점에서 매우 특이하다.

#### 4.2. 피로손상도 곡선과 피로수명 예측

Fig. 7에서 Amplitude와 AUP2, Fig. 8에서 Amplitude와 AUP1의 변화를 초기값을 기준으로 정규화하면 Fig. 9 및 Fig. 10과 같은 곡선을 얻을 수 있다. 이 곡선의 형태는 고분자기지 복합재료에서 피로손상을 나타내는 지표가 되는 강성을 저하( $E/E_0$ ) 곡선과 매우 유사한 형태를 보이고 있다[13]. 즉, 피로하중을 받는 초기에 다소 급격한 감소를 보이나 이후 피로수명의 70% 이상이 경과할 때까지 더 이상 아무런 변화를 보이지 않다가 전체 피로수명의 약 75% 시점에서부터 현저한 감소를 나타낸다. 초기에 나타나는 약간의 감소는 미세균열의 형성과 관련이 있는 것으로 알려져 있으며, 후기의 현저한 감소는 피로하중에 의한 접합면의 분리가 확대됨에 따라 계면을 통해 전파되는 신호의 감쇠로 인하여 Amplitude가 감소하며, 신호에너지의 총량을 의미하는 AUP1도 감소한다. 또한 AUP2의 감소는 신호에너지의 주파수에 따른 분포에서 중심주파수가 저주파수 영역으로 이동한 것을 뜻하는 바, 이 또한 계면의 분리에 의한 감쇠효과가 고주파수 성분일수록 더욱 현저할 수 밖에 없기 때문이다. 따라서 정규화된 AUP 곡선을 피로손상도 곡선으로 활용할 수 있다고 판단하였으며, 이 곡선에서 초기의 감소 이후 장기간 거의 변화를 보이지 않다가 후반기에서 현저한 감소가 나타나는 부분이 대략 피로수명의 75%에 해당하는 점으로부터 잔여수명의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

이러한 결과는 적어도 본 실험에 사용된 시편과 유사한 조건하서라면 일정기간은 피로하중에 따른 접합부의 손상누적이 무시할 정도로 작으나, 이러한 매우 작은 손상이 누적되어 어떤 시점에 도달하면 그 때부터는 빠른 속도로 계면분리가 진행되고 결국에는 파괴가 일어나는 것으로 이해할 수 있다. 이러한 결과를 활용하여 본 연구에서처럼 파괴강도에 비하여 비교적 낮은 피로하중이 걸리는 경우 건전한 접합상태를 유지할 수 있는 한계와 피로수명의 예측이 가능할 것이다.

그러나 AE센서를 통해서 얻어지는 측정 데이터는 여러 가지 잡음에 오염될 가능성이 항상 존재하고, 시편

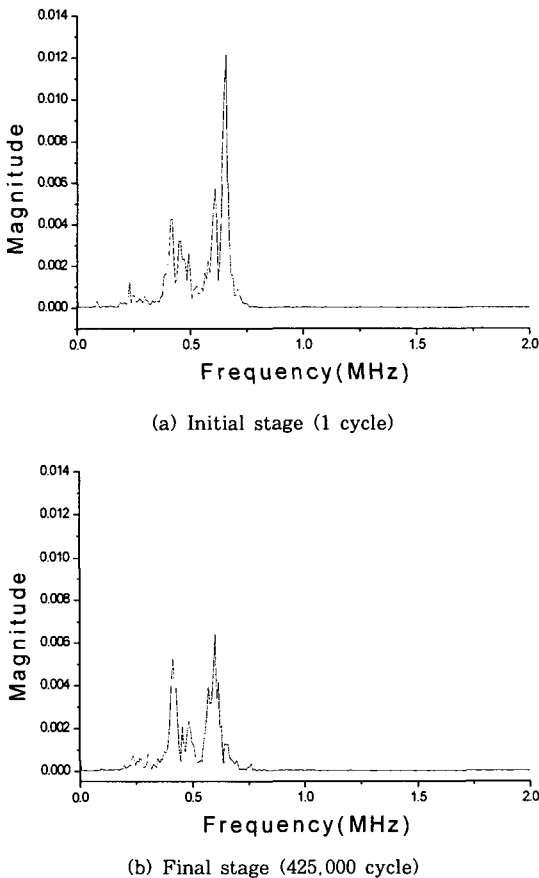
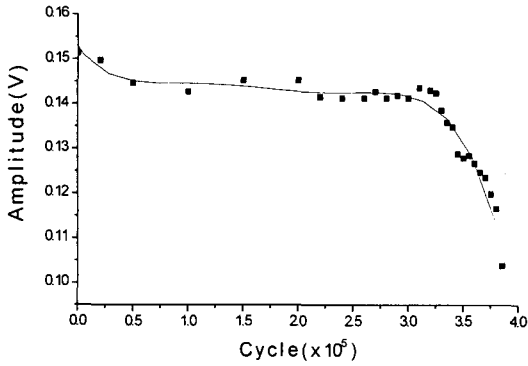


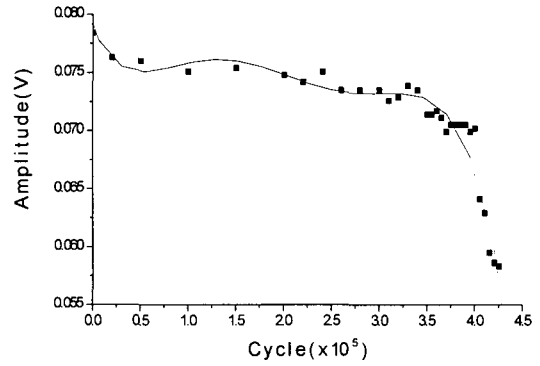
Fig. 6 Power spectra of AU detected signals from the measurements during the initial and the final stages of the fatigue test for double-lap joints

이 접합상태도 접착 당시의 조건에 따라 오차가 발생하였을 확률도 무시할 수 없으므로 이 결과를 실제 상화에서 접합구조물에 사용하기에는 보다 다양한 문제점에

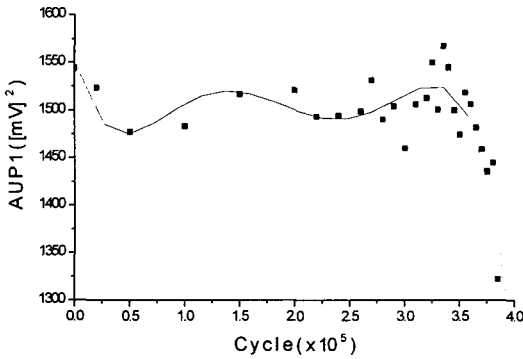
대한 검토와 연구가 필요하리라고 본다. 예를들어 이중접치기 시편의 경우에는 시험편의 형상이 복잡해짐으로써 입력신호가 전파되는 과정에서 단일접치기 시편의



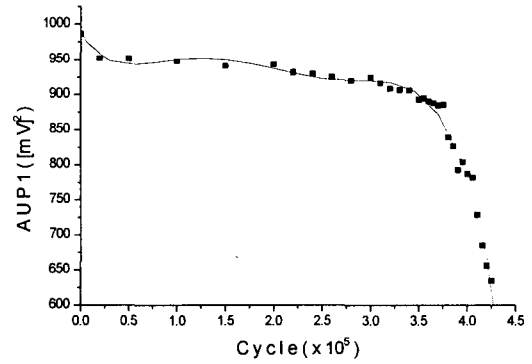
(a) Amplitude



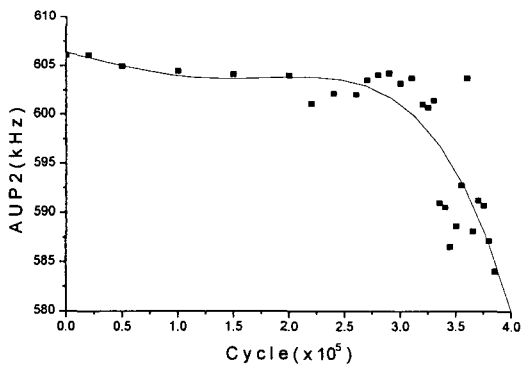
(a) Amplitude



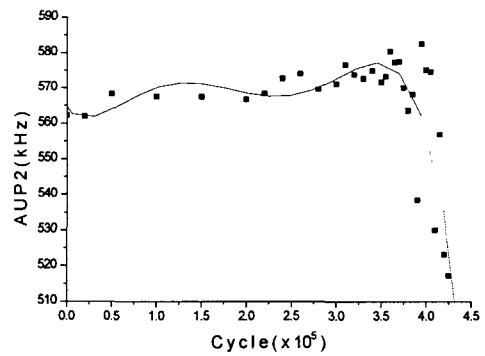
(b) AUP1



(b) AUP1



(c) AUP2



(c) AUP2

Fig. 7 Effect of fatigue damage at the interface on the Amplitude, AUP1, and AUP2 for single-lap joints

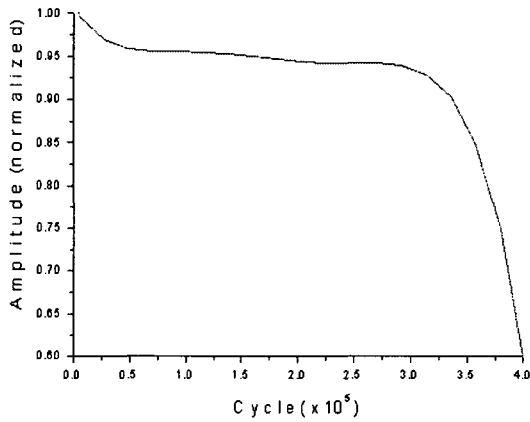
Fig. 8 Effect of fatigue damage at the interface on the Amplitude, AUP1, and AUP2 for double-lap joints

경우와는 매우 다른 결과를 가져오는 것을 알 수 있다. 따라서 복잡한 형상의 실제구조물에 대하여 이 방법을 적용하기 위해서는 우선 AUP 중에서 어느 것을 기준 변수로 선정함이 최적인지를 결정할 필요가 있으며 그 이후에 평가에 활용해야 할 것이다.

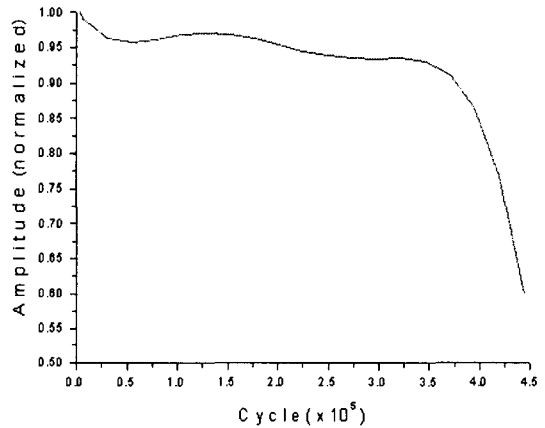
5. 결 론

AU법에 의해 Amplitude, AUP1, AUP2를 측정함으로써 복합재료-금속 접착접합부의 피로손상 누적에 대한 실시간 평가가 가능함을 밝혔으며, 다음과 같은 결

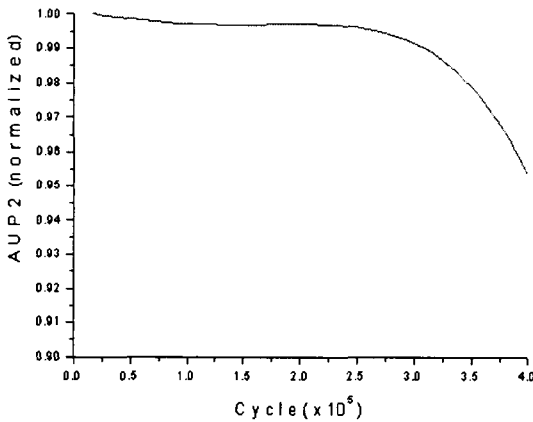
론을 얻었다. 첫째, 접착접합부의 피로손상의 누적에 따른 AUP의 변화를 나타내는 곡선이 고분자기지 복합재료의 피로손상의 지표가 되는 강성을 저하( $E/E_0$ )를 나타내는 곡선과 매우 유사한 형태를 보이므로 이를 바탕으로 피로손상의 실시간 예측이 가능하다. 둘째, 전체 피로수명의 약 75% 지점에서부터 나타나는 Amplitude, AUP1, AUP2의 급격한 변화를 통해 잔여 피로수명의 예측이 가능하지만, 이는 피로하중의 최대 값이 접합부 파괴하중의 10%를 넘지않는 범위에 국한된다. 셋째, 이러한 AU법을 실물구조에 적용함에 있어서는 접합부 형상에 따라 AUP 중에서 가장 효과적인



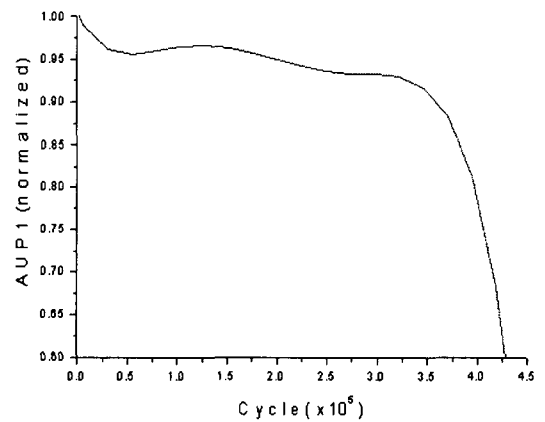
(a) Normalized Amplitude



(a) Normalized Amplitude



(b) Normalized AUP2



(b) Normalized AUP1

Fig. 9 Development of damage at the interface in terms of Amplitude and AUP2 normalized with fatigue cycles for single-lap joints

Fig. 10 Development of damage at the interface in terms of Amplitude and AUP1 normalized with fatigue cycles for double-lap joints



인 변수를 선정하여 활용해야 한다.

## 후 기

본 논문은 1997년도 교육부 기계공학분야 연구비 지원에 의하여 수행된 연구과제(ME-97-C-29)의 결과이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] G. B. Chapman, Jr., "A nondestructive methods 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, Philadelphia, PA, 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, Ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 379-397, (1992)
- [7] M. T. Kiernan and J. C. Duke, Jr., "PC analysis of an acousto-ultrasonic signal", Materials Evaluation, Vol. 46, pp. 1344-1352, (1988)
- [8] H. Frank and S. C. Altheon, "Statistics: concepts and applications", pp. 62-77, Cambridge University Press, (1994)
- [9] P. A. Dickstein, S. Girshovich, Y. Sternberg, A. N. Sinclair and H. Leibovitch, "Ultrasonic feature-based classification of the interfacial condition in composite adhesive joints", Res. Nondestr. Eval. Vol. 2, pp. 207-224, (1990)
- [10] G. E. Hearn and A. V. Metcalfe, Spectral Analysis in Engineering: Concepts and Cases, Arnold, London, (1995)
- [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] 이종오, 이주석, 윤운하, 이승희, "음향방출시험에 의한 복합재료 접합부의 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 제16권 제2호, pp. 79-85, (1996)
- [13] R. D. Jamison, K. Schulte, K. L. Reifsnider, and W. W. Stinchcomb, in "Effect of defects in composite materials", ASTM STP 836, pp. 21-55, (1984)