

## Al 7075/CFRP 샌드위치 복합재료의 강도 및 손상특성에 대한 비파괴 평가

이진경<sup>†</sup> · 윤한기\* · 이준현\*\*

(2002년 3월 2일 접수, 2002년 8월 29일 심사완료)

### Nondestructive Evaluation on Strength Characteristic and Damage Behavior of Al 7075/CFRP Sandwich Composite

Jin-Kyung Lee, Han-Ki Yoon and Joon-Hyun Lee

**Key Words:** Al/CFRP Hybrid Composite(Al/CFRP샌드위치복합재료), Nondestructive Technique(비파괴기술), Acoustic Emission(음향방출), AE Parameters(AE파라미터), Optical Microscope(광학현미경)

#### Abstract

A hybrid composite material has many potential usage due to the high specific strength and the resistance to fatigue, when compared to other composite materials such as fiber reinforced plastic(FRP) and metal matrix composite(MMC). However, the fracture mechanism of hybrid composite material is extremely complicated because of the bonding structure of metals and FRP. In this study, Al 7075 sheets and carbon epoxy preprags were used to fabricate the hybrid composite. Recently, nondestructive technique has been used to evaluate the fracture mechanism of these composite materials. AE technique was used to clarify the microscopic damage behavior and failure mechanism of Al7075/CFRP hybrid composite. It was found that AE parameters such as AE event, energy and amplitude were effective to evaluate the failure process of Al 7075/CFRP composite. In addition, the relationship between the AE signal and the characteristics of fracture surface using optical microscope was discussed.

#### 1. 서론

금속재료는 화학조성 및 열처리 조작의 방법으로는 비강도, 비강도 등의 기계적 특성과 부식저항과 같은 화학적 물성에 한계를 가지고 있기 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 공업용 재료로써는 많은 한계점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 다양한 종류의 복합재료가 개발되고 있으며 특히 이종재료를 접합하여 응용할 수 있는 새로운 개념의 하이브리드 복합재료(hybrid composite)에 대한 연구가 활발하다. 이종재료가 접합된 하이브리드 복합재료의 기계적 물성은 하이브리드

복합재료가 가지고 있는 접합구조에 크게 의존하는 것으로 알려져 있으며 접합구조에 따른 실험의 결과는 매우 다양하게 보고되고 있다.<sup>(1~4)</sup>

한편, 아라미드 섬유(aramid fiber)를 보강재로 하여 알루미늄 박판을 다층형태로 접합한 하이브리드 복합재료는 상용화되어 있으며 특히 이러한 아라미드 강화 복합재료는 내피로특성 및 기계적 물성에 관한 성질이 우수하여 이와 유사한 형태의 하이브리드 복합재료에 대한 연구가 활발하다.<sup>(5~7)</sup> 그러나 하이브리드 복합재료에 대한 상세한 정보는 해당국가에서 보호하고 있어 충분한 정보를 얻을 수 없다. 특히 일본은 새로운 산업의 선도적 역할을 하는 소재기술에 관한 연구에 주력하여 탄소/에폭시 복합재료를 이용한 하이브리드 복합재료에 대한 연구가 활발하여 상당한 자료를 축적하였으며 이러한 복합재료에 대한 기초연구가 활발

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 동의대학교 기계공학과  
E-mail : leejink@dongeui.ac.kr  
TEL : (051)890-1663 FAX : (051)890-2232

\* 회원, 동의대학교 기계공학과  
\*\* 회원, 부산대학교 기계공학과

히 진행되고 있다. 한편 하이브리드 복합재료의 강화재로서 탄소섬유는 생산방법이 다양하고 고탄성 및 고강도계로 구분되어 상용화되고 있어 탄소섬유시트를 하이브리드 복합재료에 응용하면 기존 알루미늄재료의 물성을 향상시킬 수 있는 가능성이 매우 높다. 하이브리드 복합재료 가운데 Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료는 뛰어난 비강도 및 내피로 특성 등으로 인해 차세대 항공기용 소재로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 이러한 급속/섬유 하이브리드 복합재료는 이중 소재의 결합에 의한 복합구조를 가지므로 재료 특유의 이방성과 불균일성 또는 제작과정에서 발생하는 여러 가지 형태의 결합을 내재할 가능성이 크기 때문에 그 재료 특성의 이론적 해석이 어렵고, 섬유와 적층방향 및 적층순서에 따라 매우 복잡한 파괴 특성을 가지고 있어 파괴 특성 평가 및 정량화가 매우 곤란한 실정이다. 따라서 최근에는 비파괴 평가기법을 이용하여 복합재료 또는 구조물 내부에 존재하는 결합 및 재료의 손상정도를 정량적으로 평가하려는 연구들이 보고되고 있다.<sup>(8~10)</sup> 특히 음향방출 기법<sup>(11~14)</sup>은 복합재료의 파손기구 및 손상정도를 정량적으로 평가하는데 매우 유용하게 적용되고 있다. 그러나 기존의 연구가 섬유강화 복합재료에 대하여 편중되어 연구되었으며 알루미늄/섬유 하이브리드 복합재료에 대하여는 아직 연구 초기에 있는 실정이다. 그러나 Al 7075/CFRP 복합재료의 우주항공, 자동차, 선박 등의 재료로 광범위한 적용을 위해서는 이러한 재료의 파괴특성에 대한 정확한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 음향방출 기법을 이용하여 3점 굽힘 하중을 받는 Al 7075/CFRP 복합재료의 파괴특성 및 AE 기법의 적용 가능성을 평가하고자 하였으며 광학현미경 및 화상시스템을 이용하여 시험편의 파단면과 그에 따른 파단양상을 관찰하여 복합재료의 손상정도에 따른 AE 신호특성과 비교, 검토하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

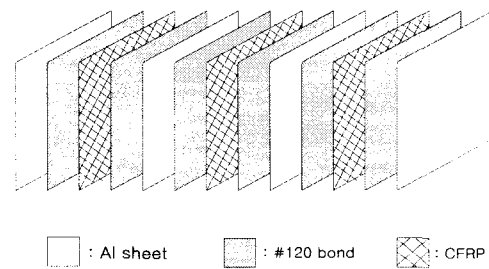
본 연구에서 사용된 Al7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 시편제작에 사용된 소재는 알루미늄 합금 Al7075-T6(QQ-A-250/13E)와 고탄성 탄소강화섬유 HE CFRP(Torayca M40)를 사용하였

**Table 1** Chemical composition of Al7075-T6 sheet wt(%)

Element	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti
Al7075-T6	5.1 ~ 6.1	2.1 ~ 2.9	1.2 ~ 2.0	0.18 ~ 0.35	max 0.30	max 0.50	max 0.40	max 0.20

**Table 2** Mechanical properties of epoxy, CFRP and aluminum

Properties	epoxy	CFRP	Al
	250°F #2560	45°	7075
Tensile strength(MPa)	55~120	230	483
Yield strength(MPa)	-	-	414
Elastic modulus(GPa)	3.1~4.7	32	71
Failure strain(%)	2.0~3.5	4.5	12
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.10~1.25	1.85	2.79



**Fig. 1** Schematic structure of specimen

다. 알루미늄 합금은 두께 0.7mm의 얇은 박판으로 냉간가공 후 인공시효처리 하는 T6계 열처리 후 Alcladding 표면처리를 거친 미국 Alclad사 제품을 사용하였다. Table 1은 Al7075-T6 시트의 화학조성을 나타낸 것이다. 또한 탄소강화섬유 프리프레그는 Toray사 상품명 Torayca M40급인 탄소섬유에 한국화이버에서 배합한 Modified 에폭시 수지를 함침시켜 반경화시킨 제품을 사용하였다. Table 2는 이들 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 알루미늄판의 표면처리는 크롬산 산화피막처리(Chromic Acid Anodizing, CAA)를 하였다. 접착공정은 준비된 프리프레그(prepreg)를

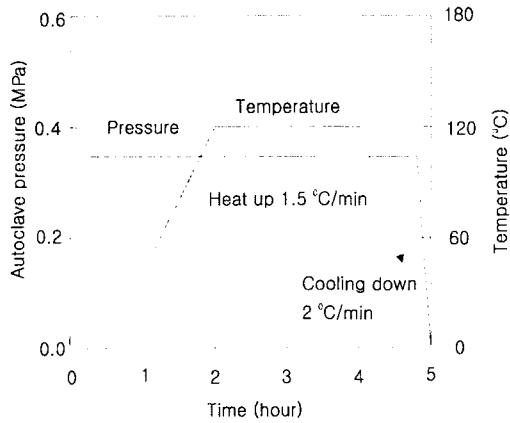


Fig. 2 Diagram of autoclave curing procedure

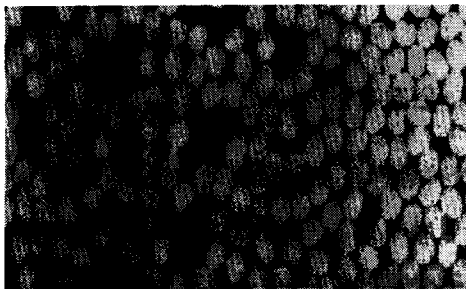


Fig. 3 SEM photograph according to the carbon fiber orientation( $\pm 45^\circ$ ) in Al7075/CFRP hybrid composite

[ $45^\circ$  /  $-45^\circ$ ]로 적층한 후 오토클레이브(autoclave) 시험기에서 Fig. 1과 같이 알루미늄과 CFRP를 교대로 적층하여 성형하였으며, 시험편의 규격은 120mm×22mm×5mm로 정하였다. 성형조건은 Fig. 2와 같이 1.5°C/min의 승온속도로 120°C까지 승온한 후, 0.34MPa 압력에서 120분간 유지하였다. 성형이 완료된 후 시험편의 휨을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 2°C/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하여 시험편을 제작하였다.

Fig. 3에서는 위와 같은 방법으로 제작한 시험편의 단면형상을 나타낸 것으로 탄소섬유의 적층 방향이  $\pm 45^\circ$  인 시험편의 절단된 단면에서의 탄소 파이프의 형상이 타원형임을 알 수 있다.

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Al 7075/CFRP 하이브리드 복합

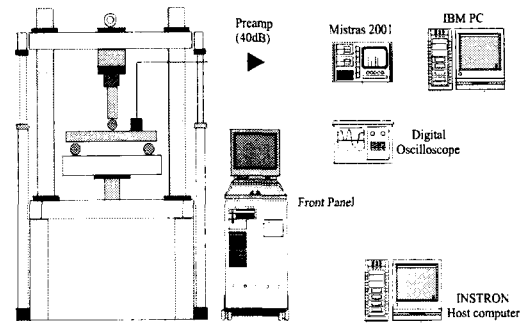


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up



Fig. 5 Load direction of (a) flat-wise and (b) edge-wise

재료의 하중 증가에 따른 손상 정도를 비파괴적 기법을 적용하여 평가하기 위해 시험편에 AE 센서를 부착하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다.

Fig. 4는 전체적인 실험장치의 개요도를 나타낸 것으로 시험편 정면에 광대역 AE 센서(WD, 100~1200kHz)를 부착하였다. 또한 하이브리드 복합재료는 재료에 작용되는 여러 하중 조건에 따라 파괴특성이 다른 이방성 재료이므로 알루미늄과 CFRP와의 접합상태를 평가하기 위하여 Fig. 5와 같이 플랫 방향(flat-wise)과 에지 방향(edge-wise)으로 하중을 가하여 각 하중방향에 따른 파괴특성을 평가하였으며 에지 방향으로 하중을 가할 시 시험편의 압괴로 인한 파손을 방지하기 위하여 중앙부에 폭 0.5mm, 길이 5mm의 노치를 도입하였다. 한편, 최대 10톤의 유압식 재료시험기(INSTRON 8501)에서 하중이 가해지면 시험편내의 균열발생, 성장 등으로 인한 탄성파가 발생한다. 이때 발생된 탄성파는 AE 센서에 의해 감지된 후 예비증폭기(PAC 1220A, 100~1200kHz)에서 40dB 증폭되어 AE 본체(MISTRAS 2001)로 보내어진다. AE 본체로 보내어진 신호는 AE 사상수(event), 에너지(energy), 진폭(amplitude) 등의 AE 인자들로 분석되어진다. 그리고 디지털 오실

로스코프(LeCroy 9310)를 이용하여 각 발생원에 대한 AE 신호의 파형 및 주파수 특성을 분석하였다. 또한 3점 굽힘 시험시 시험편에 가해지는 하중은 0.5mm/min으로 변위를 제어하였으며, 양 지지점 사이의 거리는 100mm로 정하였다. 그리고 AE 센서에 수신되는 전기적, 기계적 잡음을 제거하기 위하여 문턱전압값을 점차적으로 올려 17.8mV로 설정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 플랫폼방향의 하중에 대한 미시적 변형거동 및 AE 특성

Fig. 6은 하중이 증가함에 따라 발생하는 AE 사상수의 변화특성을 나타낸 것으로 하중변화 및 AE 사상수에 따라 크게 4영역으로 나눌 수 있음을 알 수 있다. 즉, 하중초기에 하중이 점차적으로 증가하여도 AE 신호가 발생하지 않는 I영역, 그리고 최대하중의 약 60%까지의 탄성영역으로 하중이 증가함에 따라 소수의 AE 신호가 발생하는 II영역, 하중극점이 비선형성을 보이며 AE 사상수가 거의 일정하게 발생하는 III영역, 최대 하중점에서 급격한 AE 사상수의 증가를 보이다 점차적으로 감소하는 IV영역으로 나눌 수 있다.

먼저 탄성영역 초기의 I 영역에서는 하중초기에는 AE 사상수가 발생하지 않지만 점차적으로 하중이 증가하여 II영역에 도달하게 되면 소수의 AE 사상수가 발생한다. 이때 발생하는 AE 신호는 복합재료내의 국부적인 응력집중 및 CFRP내의 에폭시의 미소균열의 발생에 의해 소수의 AE 신호가 발생하게 된다. 이러한 결과는 Fig. 13의 화상시스템 및 광학 현미경을 이용한 표면관찰결과 CFRP에서의 에폭시의 균열발생 및 성장을 관찰할 수 있었다. 한편 하중이 증가하여 III영역으로 진행하면 복합재료의 소성변형에 의해 하중극점이 비선형성을 나타내며 에폭시에서 발생한 균열들이 성장하고 서로 합체(link-up)하여 내부로의 전파 및 기지재인 알루미늄의 소성변형에 의해 AE 사상수는 30여개 정도로 일정하게 발생하는 경향을 나타낸다. 그러나 III영역의 최대하중점에 도달하게 되면 현저한 AE 사상수의 증가를 보이며, 이때 시험편은 CFRP의 층간분리 현상이 발생하게된다. 그리고 이러한 층간분리가 발생한 후 시험편은 더 이상 하중을 지탱할 수 없는 실

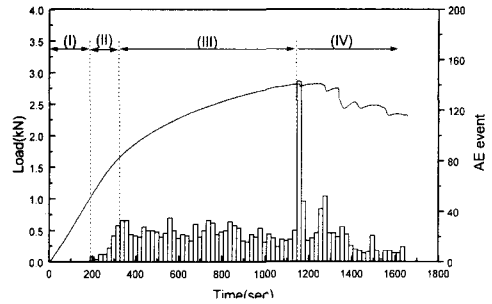


Fig. 6 Load and events versus time

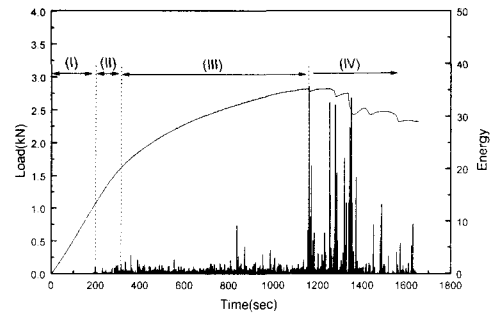


Fig. 7 Load and energy versus time

질적인 파괴에 도달하게 되며 층간분리 현상이 증가함에 따라 하중과 AE 사상수는 점차적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 7은 하중의 증가에 따라 발생한 AE 신호의 에너지의 변화를 나타낸 것으로 II, III영역에서 에폭시의 미소균열 발생 및 성장에 의한 신호는 5이하의 매우 낮은 에너지레벨을 나타낸다. 그러나 IV영역의 CFRP의 층간분리에 의해 발생한 신호는 층간분리의 발생 및 성장, 그리고 센서로부터의 층간분리 방향 등에 의해 II, III영역보다 현저히 높은 10이상의 높은 에너지레벨을 나타내는 신호가 다수 발생하였다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 AI7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 플랫폼방향으로 하중을 가하였을 경우 각각의 영역에서 발생하는 AE 신호들의 여러 인자들이 서로 다른 특성을 나타내기 때문에 이를 분석함으로써 하이브리드 복합재료의 손상정도를 평가하는데 있어서 AE 기법이 유효함을 알 수 있다.

#### 3.2 예지방향의 하중에 대한 미시적 변형거동 및 AE 특성

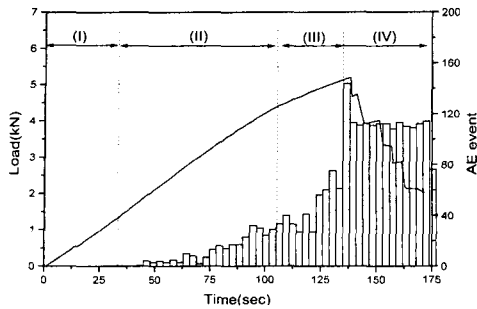


Fig. 8 Load and AE event versus time

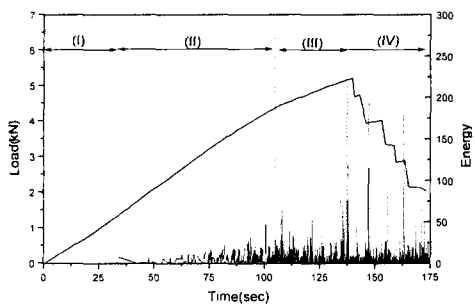


Fig. 9 Load and energy versus time

Fig. 8은 에지방향의 하중이 증가함에 따라 발생하는 AE 사상수의 특성을 나타낸 것으로 하중 및 AE 신호의 발생경향 특성에 따라 4영역으로 나눌 수 있었다. 먼저 최대하중의 약 20%까지 AE 사상수가 발생하지 않는 I 영역, 하중이 선형적으로 증가하여 최대하중의 약 90%까지 AE 사상수가 하중이 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 나타내는 II영역, 하중곡선의 기울기가 감소하여 최대하중까지 AE 신호가 40개 이상 현저히 증가하는 III영역, 마지막으로 하중이 감소함에 따라 AE 신호가 거의 변화가 없는 IV영역으로 나눌 수 있다.

앞의 플랫폼방향 시험편과 마찬가지로 최대하중의 약 20%지점까지인 I 영역에서는 하중이 증가하더라도 재료내부에 손상을 받지 않아 AE 사상수가 발생하지 않는다. 그러나 II영역으로 진행하면 하중이 증가함에 따라 노치 선단에서의 국부적인 응력집중 및 재료내부에서의 에폭시의 균열이 발생, 성장함에 따라 AE 사상수도 점차적으로 증가하게 된다. 이러한 결과는 앞의 플랫폼방향 시험편에서의 에폭시의 파단 및 성장에 의한 AE 신호 발생경향과 비슷한 양상을 나타내었다. 또

한 III영역, 즉 최대하중의 약 80%지점부터 하중곡선의 기울기가 감소하는 영역이 발생하는데 이 영역에 도달하게 되면 시험편의 노치 선단으로부터 미소균열이 발생하여 시험편 내부로 전파하여 거시균열로 성장하게 된다. 이때 CFRP내의 소수의 파이버의 파단 및 균열성장에 의해 AE 사상수는 점차적으로 증가하게 된다. 그리고 최대 하중에 도달하게 되면 알루미늄과 CFRP의 계면박리현상이 발생하고 CFRP내의 층간분리현상 및 다수의 파이버가 파단됨에 따라 AE 사상수도 급격히 증가한다. 최대하중이후 시험편 내부로 균열성장이 현저함에 따라 하중도 점차적으로 감소하게 된다. 그러나 발생하는 AE 신호는 CFRP내의 각 프리프레그의 마찰, 파이버 파단, 거시적 균열성장 등에 의해 일반적인 복합재료 시험편과는 달리 일정하게 발생하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 하중의 증가에 대한 AE 에너지의 변화를 나타낸 것으로 II영역에서는 노치선단에서의 응력집중 및 에폭시에서의 미소균열의 발생 및 성장에 의한 AE 신호의 에너지로서 40이하의 에너지레벨을 나타낸다. 그러나 하중이 점차적으로 증가하여 III영역에 도달하게 되면 노치선단으로부터의 미소균열이 발생하여 CFRP내의 소수의 파이버가 파단됨과 동시에 복합재료 내부로의 균열이 전파함에 따라 40-80 범위의 에너지 레벨을 나타내는 신호가 발생하게 된다. 그리고 IV영역에서의 CFRP내의 층간분리 현상 및 프리프레그의 마찰현상이 발생하면 현저히 높은 200까지의 에너지 레벨을 나타내는 신호가 다수 발생하게 된다. 이와 같이 앞의 플랫폼 방향의 시험편과 에지방향의 시험편의 파손기구가 달라짐에 따라 발생하는 AE 사상수는 비슷한 경향을 나타내었지만 에너지 레벨은 파손기구에 따라 에지 방향에서 현저히 높게 나타났다.

### 3.3 AE 신호의 파형 및 주파수 특성

본 연구에서는 Al 7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 파괴 양상에 따라 발생하는 AE 신호를 평가하기 위하여 AE 신호의 파형 및 주파수 특성을 분석하였다.

Fig. 8의 III영역 및 IV영역에서 주로 발생하는 섬유 파단에 의한 신호는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 돌발형 형태의 신호가 발생하며 주파수 대역 또한 광범위하게 나타났으며 중심주파수도

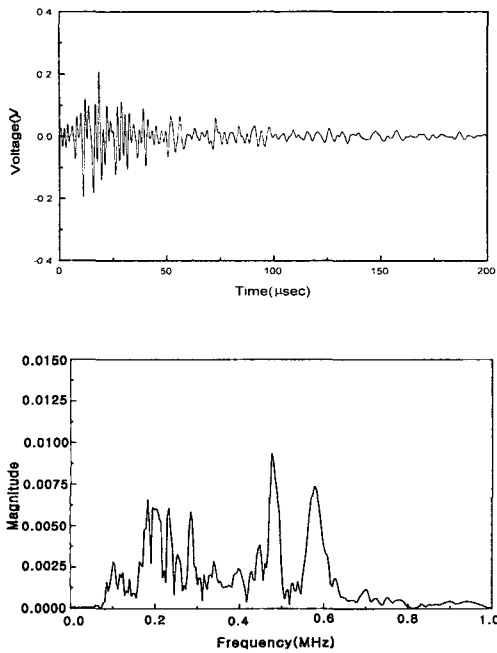


Fig. 10 Typical example of waveform and spectrum corresponding to fiber breakage

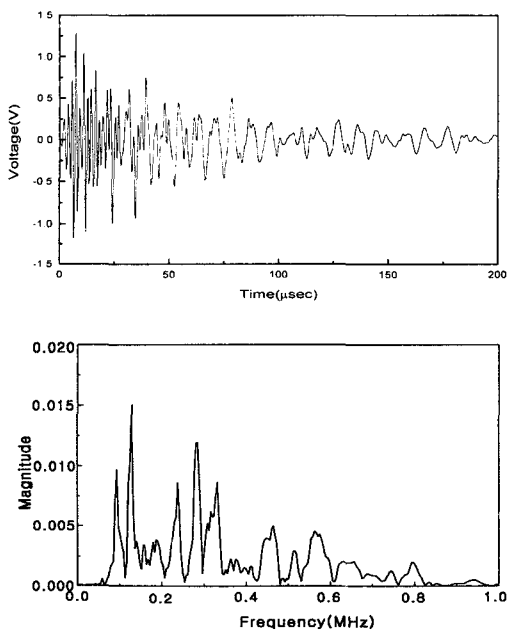


Fig. 11 Typical example of waveform and spectrum corresponding to delamination

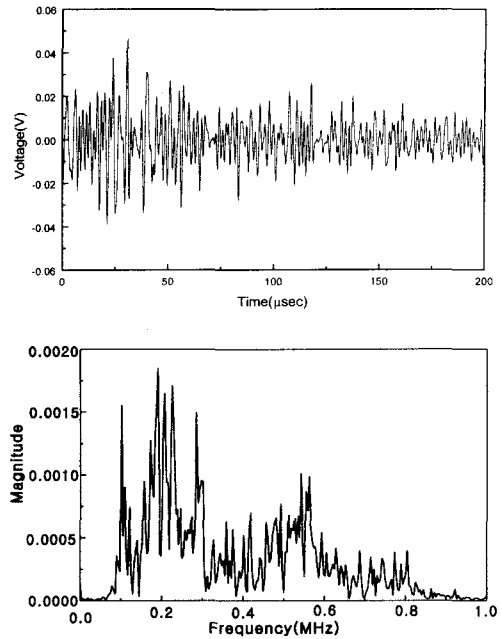


Fig. 12 Typical example of waveform and spectrum corresponding to aluminum fracture

480-600kHz로 고주파수 대역을 나타내었다. 그리고 Fig. 6의 IV영역과 Fig. 8의 IV영역에서 나타나는 CFRP의 층간분리시 발생하는 신호는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 다른 파손기구와는 달리 진폭이 매우 크며 지속시간이 긴 파형 형태를 나타내며 주파수는 120kHz 및 280kHz 부근에서 최대 주파수 대역을 나타내었다. 또한 알루미늄의 파단시 발생하는 신호는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 낮은 진폭의 파형과 100-300kHz에서 최대진폭의 주파수 대역을 나타내었다.

### 3.4 하이브리드 복합재료의 파손기구

본 연구에서는 3점 굽힘 시험과정에서 시험편의 측면에 화상시스템(Model KSM-S II)을 설치하고 연속으로 파손기구를 관측하였으며 광학현미경을 이용하여 파단면을 관찰한 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

그림에서 보여주는 바와 같이 Fig. 13(a)에서는 하중초기 예폭시에서 균열이 발생을 알수 있으며 Fig. 13(b)와 같이  $\pm 45^\circ$ 로 탄소섬유가 배열된 경우에는 최대치짐량이 지지점 스패의 10%이상 변형되었을 때 인장 및 압축응력이 최대가 되는

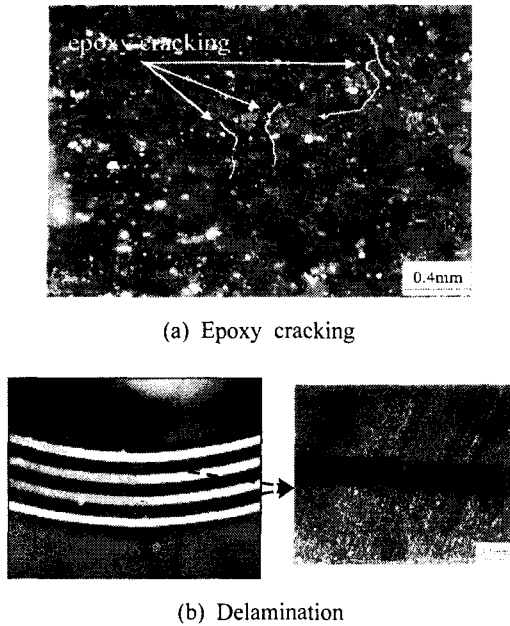


Fig. 13 Fracture surface of Al7075/CFRP composite using optical microscope

중앙 상부 및 저면에서의 CFRP 내부의 프리프레그 사이에 층간분리현상이 발생하며 층간분리 현상이 현저해져 Al 7075와의 계면으로 성장함과 동시에 하중이 감소하는 파손기구를 보였다. 이러한 파손기구는 Lee<sup>(15)</sup> 등에 의해 연구된 Al7075/CFRP 복합재료의 노치선단에서의 강도 및 파손기구와 유사한 결과를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 휨 거동을 하는 Al 7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 파괴특성을 평가하기 위하여 음향방출기법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 플랫폼방향의 하중 증가에 따른 시험편의 파괴양상 및 AE 특성을 크게 4영역으로 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

i) 하중초기 탄성영역으로 AE 신호가 발생하지 않는 I 영역

ii) 점차적인 하중증가와 더불어 에폭시에서의 균열이 발생하여 AE 사상수가 소수 발생하는 II 영역

iii) 하중증가와 더불어 발생한 미소균열 성

장 및 합체에 의해 AE 사상수가 일정한 III영역

iv) CFRP의 층간분리에 의해 현저한 AE 사상수의 증가를 보이는 IV영역

(2) 에지방향의 하중 증가에 따른 시험편의 파괴양상도 크게 4영역으로 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

i) 하중초기에 AE 사상수가 발생하지 않는 I 영역

ii) 하중이 증가함에 따라 에폭시에서의 미소균열 발생 및 노치선단의 국부적인 응력집중에 의한 AE 사상수가 점차적으로 증가하는 II영역

iii) 노치선단으로부터 거시적 균열이 발생, 성장함에 따라 다수의 AE 사상수가 발생하는 III영역

iv) CFRP의 층간분리, 알루미늄과 CFRP의 계면박리, 알루미늄의 파단에 의해 일정한 AE 사상수를 보이는 IV영역

(3) Al 7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 파괴기구를 규명하는데 있어서 음향방출기법을 적용하여 그 타당성을 평가한 결과 AE 사상수, 에너지 등과 같은 AE 인자들을 통하여 복합재료의 손상정도 및 파손기구를 평가하는데 있어서 매우 유용함을 알 수 있었다.

(4) 섬유 파단에 의한 신호는 지속시간이 짧은 돌발형 형태의 파형을 나타내며 중심주파수는 480~600kHz로 고주파수를 나타내었으며 층간분리시 발생하는 신호는 매우 고진폭의 신호지만 120kHz, 280kHz의 낮은 주파수특성을 나타내었으며 알루미늄의 파단에 의한 신호의 주파수 범위는 100~300kHz이며 연속형 파형을 나타내었다.

#### 참고문헌

- (1) Park, R. and Jang, J.S., 2001, "Impact Behavior of Aramid Fiber Glass Fiber Hybrid Composite: Evaluation of Four-Layer Hybrid Composites," *J. of Materials Science*, Vol.36, No.9, pp. 2359~2367.
- (2) Middleton, D.H., 1990, "Composite Materials in Aircraft Structure-The Involvement of the United States Aircraft Structure Industry in the Development of Advanced Composite Materials, *Longman Scientific & Technical, John Wiley Inc., New York*, pp. 273~288.

- (3) Marissen, R., 1984, "Flight Simulation Behaviour of Aramid Reinforced Aluminum Laminates(ARALL)," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 2, pp. 261~277.
- (4) Gunnink, J. W. and Vogelesang, L. B., 1988, "ARALL Laminates Structures Toward the Supportable and Durable Aircraft," *20th international SAMPE Technical Conference*, pp. 605~606.
- (5) Lin, C. T., Kao, P. W. and Yang, F. S., 1991, "Fatigue Behaviour of Carbon Fiber-Reinforced Aluminium Laminates," *Composites*, Vol. 22, No. 2, pp. 135~141.
- (6) Yoon, H. K., 1994, "The Effect of Bridging on Fatigue Crack Growth Behavior in Aramid Patched Aluminium Alloy(APAL)," *J. of KSME*, Vol. 8, No. 4, pp. 375~384.
- (7) Lee, D. K., Kim, D. J. and Ha, S. K., 1998, "Optimal Design of a Hybrid Composite Flywheel Rotor," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 7, pp. 1287~1298.
- (8) Lee, J. K., Lee, J. H., Lee, M. R and Choi, H. S., 2000, "AE Characteristics on Microscopic Failure Behavior of Carbon/Epoxy Composite Prepared by Cocure and Precure Process," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 10, pp. 2520~2528.
- (9) Yoseph Nar-cohen, Ajit Mal, Shyh-Shiuh Lih, Zensheu Chang, 1999, "Composite Materials Stiffness Determination and Defects Characterization Using Enhanced Leaky Lamb Wave Dispersion Data Acquisition Method," *Proceedings of SPIE Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware III*, pp. 250~255.
- (10) Nihat Bilgutay, John Popovics, Sandor Popovics, Meric Karaoguz, 2001, "Recent Developments in Concrete Nondestructive Evaluation," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing - Volume 6*, pp. 3393~3396.
- (11) Lee, J. H., Yoon, D. J. and Kwon, O. Y., 1992, "Acoustic Emission Monitoring of Fracture Process of SiC/Al Composite Materials," Seattle, U.S.A, pp. 300~309.
- (12) Lee, J. H., Lee, J. K., Jang, I. Y. and Yoon, D. J., 1997, "A Study on Microscopic Failure Behavior of Mortar using Acoustic Emission," *J. of KSC*, Vol. 10, No. 6, pp. 203~211.
- (13) Wevers, M., Verpoest, I., Aernoudt, E. and De Meester, P., 1986, "Analysis of Fatigue Damage in CFR Epoxy Composites by Means of Acoustic Emission: Setting Up a Damage Accumulation Theory," *The Second International Conference on Acoustic Emission*, pp. 186~190.
- (14) Masaru Takahashi, Hidehiko Tanaka, Kohichi Tamura, and Seiichio Tomoura, 1989, "Fracture Process and AE Characteristics of CFRPs During Three Point Bending Test," *Progress in Acoustic Emission 2*, JSNDI, pp. 450~457.
- (15) Lee, J. H., Kim, Y. H., Park, J. S. and Yoon, H. K., 2000, "The Study on Notch Strength Characteristics with Circular Hole Notch in Al7075/CFRP Layered Composites," *J. of the KSCM*, Vol. 13, No. 3, pp. 58~66.