

## 論文

Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP)복합재의 파괴 거동에 따른  
Acoustic Emission(AE)신호 특성에 관한 연구

이경원\*, 김종현\*, 김재성\*, 이보영\*\*

A Study on the characteristics of the Signals of AE  
according to Fracture mode of CFRP

Kyungwon Lee\*, Jonghyun Kim\*, Jaeseong Kim\* and Boyoung Lee\*\*

## ABSTRACT

Recently, the wide range of the composite materials is used for the making airplanes, trains and automobiles body for the lightweight. Despite having complex structures, composite materials usually have well defined mechanical characteristics. However, composite materials are difficult to understand the fracture mechanism clearly by simple mechanical test. Nondestructive evaluation (NDE) combined with mechanical testing can play a more important role and especially Acoustic Emission Testing (AET) would become known to be a useful tool to assess damage and fracture behavior of composites. In this study The experiment was performed to acquire the acoustic emission signal during tensile test using unidirectional CFRP specimen and the data was analyzed the acoustic emission parameters with the waveform.

**Key Words** : Acoustic Emission(음향방출: AE), AE parameter(음향방출 파라미터), Carbon Fiber Reinforced Plastic(탄소섬유강화플라스틱: CFRP), Glass Fiber Reinforced Plastic(유리섬유강화플라스틱: GFRP), Waveform(음향파형)

## 1. 서 론

최근의 급격한 산업발전과 고도로 전문화된 산업 사회에서 신소재 개발과 더불어 신소재의 응용과 적절한 사용이 무엇보다 중요시 되고 있다. 그 중 대표적인 탄소섬유강화 플라스틱(이하 CFRP)는 1950년대에 연구가 시작되어 1980년대부터는 구조용 재료로 사용되고 있다. 특히 금속합금에 비해 20~50% 정도의 중량을 감소시킬 수 있다는 장점과

비강성, 강도 및 내부식성 등이 우수하기 때문에 항공기, 인공위성분야, 선박, 철도 및 자동차 등의 운송분야, 스포츠용품, 의료기기부품 등 다양한 분야의 구조용 재료로 사용되어지고 있다.[1,2] 복합재료의 경우 섬유 및 수지와 같이 구조가 서로 다른 재질을 사용하여 제작하기 때문에 불균질한 조직 및 이방성 성질을 가지게 된다. 이로 인해 복합재료 파괴 시 금속재료와 달리 모재 균열, 섬유 파단, 층간 분리, 섬유/모재 간의 계면 분리와 같은 여러 파단 모드가 동시에 발생하게 되어 일반적인 기계적 시험방법만으로는 그 파괴 메커니즘을 명확하게 구분하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이에 많은 연구자들은 복합재료의 파괴 특성 및 손상 평가를 위해 음향방출 방법과 같은 비파괴적인 방법과 기계적 시험방법을 조합하여 파괴 메커니즘을 규명하기 위한 연구를 수행하고 있다.

음향 방출(Acoustic Emission: AE) 방법은 재료 내

2009년 12월 14일 접수~2009년 12월 27일 심사완료

\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : bylee@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

부에 국부적인 변형으로부터 발생하는 탄성파를 감지하는 비파괴적 방법으로 다른 비파괴검사방법보다 감도가 뛰어나다.[3] Carlson과 Norrbom은 모재 균열에서 층간 분리로 변하는 시점에 AE hit의 누적수가 증가된다는 연구결과를 얻었다. Awerbuch 등은 복합재료에서 일어나는 섬유 파단, 모재 균열, 층간 분리의 세 가지 파괴 모드에 대해 방출되는 탄성파 에너지 값으로 구분하였다. Surgeon 등은 복합재료의 적층 순서를 달리한 네 종류의 시편을 제작하여 인장 실험 중 스트레인게이지를 사용하여 응력-변형률 선도와 복합재료 파단시 발생하는 AE hit의 누적수, energy, duration 값을 비교하였다. 그 결과 적층 방법에 따라 파단 메커니즘이 달라지는 현상을 확인하였으며 그 파단 모드에 따른 AE 파라미터 값을 정량화하였다.[4-6]

본 연구는 선행연구결과를 바탕으로 실제 항공기에 사용되고 있는 CFRP 복합재료의 파괴 특성 평가기법 개발하기 위한 연구기초자료로 활용하기 위해 진행하였으며, 인장시험과 음향 방출 해석을 통해 신호를 획득, 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1 Acoustic Emission 방법

음향방출(Acoustic Emission: AE)이란 물체가 변형을 일으킬 때, 즉 고체에서 국부적인 내부 구조의 변화에 의한 결과로 발생하는 탄성 응력파를 측정하여 물체의 상태를 평가하는 방법이다. 따라서 AE는 소성 변형, 균열의 발생과 성장, 마찰 기구, 개재물의 파괴 및 상변화(상변태) 등에 관한 중요한 정보를 담고 있다.

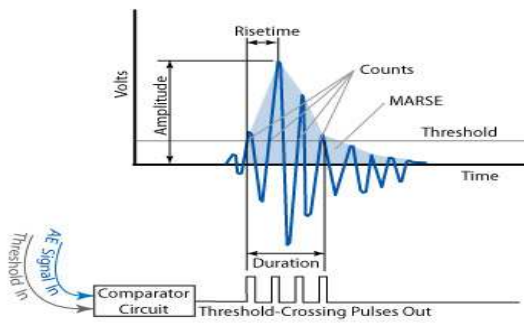


Fig. 1 AE parameter

AE는 초창기에 항공기의 금속 용접에 있어서 구조 결함을 찾아내는데 주로 이용되었고, 1970년대부터는 원자력발전소 구조물의 안전 진단에 이용되기

시작하였으며, 근래에는 다양한 구조물의 신뢰성 평가 등에 이용되고 있다. 특히 AE는 재료 평가시험과 건전성 평가 두 분야에 주로 사용이 된다. 즉, 미소결함 검출과 동시에 파괴기구의 해석 및 구조물이나 부품의 제조 중(출하 검사)이나 공정 중 비파괴 검사수단으로써 이용된다.[7] 음향방출 시험 시 나타나는 신호들을 분석하기 위해 사용되는 파라미터에는 Amplitude, Counts, Energy(Marse), Duration, Risettime 등이 있으며, 각각의 정의는 Fig 1.에 나타나 있다.

## III. 실험

### 3.1 실험 재료 및 시편제작

본 연구에서 사용한 CFRP 복합재 시편은 Toho Tenax의 PAN 계열 탄소섬유인 Tenax®-J IMS 60 E13 24K 830tex와 Cycom®5276-1 toughened Epoxy Resin로 구성된 프리프레그(prepreg)를 사용하였으며, 기계적인 물성치는 Table 1.과 같다. 또한, 사전 실험을 위해 Glass Fiber Reinforced Plastic(이하 GFRP)를 사용하여 시편을 제작하였으며 사용한 재료는 SK chemical 사의 SKY FREX-UGN150을 사용하였고 기계적인 물성치와 레진의 비율은 다음의 Table 2.와 같다.

시편은 핸드 레이업 방식으로 적층한 후 오토클레이브에 넣어 경화시켰다. GFRP 복합재 시편은 [0°]16t, [90°]16t, CFRP 복합재 시편은 [0°]12t, [90°]12t로 각 2가지 적층방법으로 제작하였다. [0°]로 적층한 시편(섬유방향과 하중인가 방향이 동일)은 섬유/모재간의 debonding을 유도하고자 하였으며, [90°]로 적층한 시편(섬유방향과 하중인가 방향이 수직)은 Matrix cracking을 유도하고자 하였다. Tab은 SK chemical 사의 GFRP 프리프레그 SKY FREX-UGN150를 이용하여, [+45°/-45°]16t 적층방법으로 제작하였고 시편의 경화 조건은 Fig 2와 3에 나타내었다.

Table 1. CFRP 물성치

#### a) Tenax®-J IMS 60 E13 24K 830tex 물성치

Tensile Strength (MPa)	5690
Tensile Modulus (GPa)	289
Elongation (%)	1.97
Density (g/cc)	1.79
filament Diameter (m)	$5.0 \times 10^{-6}$

b) CFRP 프리프레그 물성치

Tension st.mod (MPa)	3013
Compression st.mod (MPa)	1744
In-plane shear st.mod (MPa)	139

Table 2. GFRP 프리프레그 물성치

Grade	두께 (mm)	Total Wt (g/m <sup>2</sup> )	Fiber AreaWt (g/m <sup>2</sup> )	Resin Content(%)	Scrim FiberWt(g/m <sup>2</sup> )
UGN150	0.122	224	150	33	
UGN200	0.162	299	200	33	
Tensile Strength			150 kg/m <sup>2</sup>		
Tensile Modulus			7.4×10 <sup>9</sup> kg/m <sup>2</sup>		
Fiber Density			2.5 g/cm <sup>3</sup>		
Resin Density			1.2 g/cm <sup>3</sup>		

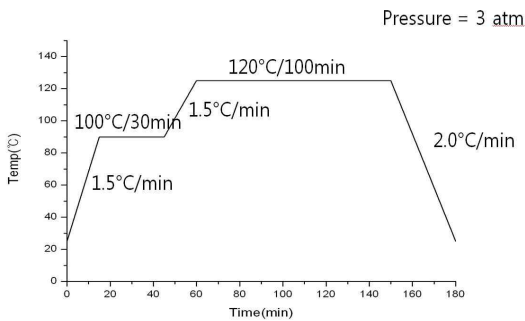


Fig. 2 GFRP의 경화 조건

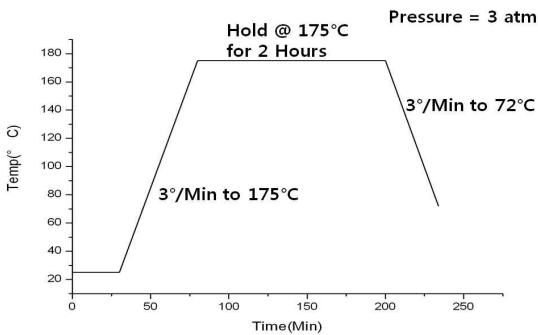


Fig. 3 CFRP의 경화 조건

Tab과 시편의 접착은 Loctite hysol 1C를 사용하였으며, 오븐에 넣어 60°C 환경에서 2시간 동안 경화시켰다. 시편과 tab은 ASTM D 3039에 제시되어있는 규격을 따라 제작하였으며(Fig 4.참조) 완성된 시편은 다음의 Fig 5, 6.와 같다.

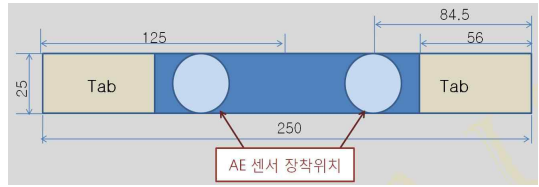


Fig. 4 복합재 인장시편의 규격 및 센서부착위치



Fig. 5 완성된 GFRP 복합재 시편



Fig. 6 완성된 CFRP 복합재 시편

3.2 실험 방법

실험은 MTS-810 인장 시험기를 이용하여 진행하였다. 센서와 시편은 tape를 이용하여 고정시켰으며, 복합재료에서 발생하는 탄성과 검출 시 AE 센서에서 발생하는 노이즈를 최소화하기 위해 진공그리스를 접촉매질로 사용하여 압착시켰다. 또한 위치 표정법을 이용하여 두 센서 사이에서 발생한 신호만을 획득하였다. 시험장치의 개략도는 Fig 7.과 같으며, Fig 8.은 인장시험기에 시편이 장착된 모습을 보여주고 있다.

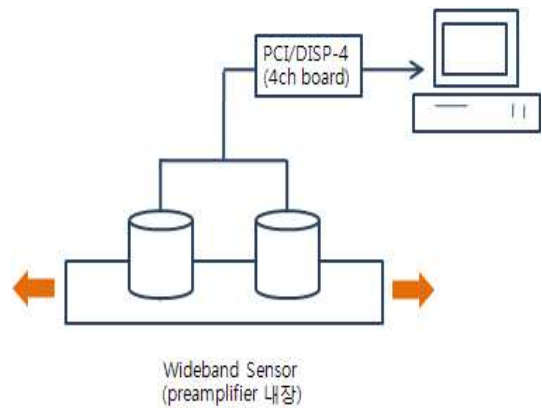


Fig. 7 실험장치의 개략도



Fig. 8 시편이 장착된 인장시험기

GFRP 복합재 시편의 경우 하중 인가속도를 0.5mm/min, 1.0mm/min, 2.0mm/min로 변화시켜 시편의 파괴거동 및 AE 신호 특성을 확인하여 CFRP 복합재 시편에 대한 인장실험 조건을 설정하였으며, 최종적으로 0.1mm/min의 변위제어방식으로 실험을 실시하였다.

실험에 사용한 장비는 PAC(Physical Acoustics Corporation)의 음향방출신호 측정 시스템인 PCI/DSP-4(4ch)와 40dB의 프리앰프가 내장된 광대역 센서인 WDI-RST를 사용하였으며, AEwin™ 소프트웨어를 이용하여 신호를 분석하였다.

#### IV. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 GFRP 복합재 시편 실험 결과

GFRP를 이용한 실험은 음향 방출의 정성적인 파라미터인 counts, amplitude, energy, duration, reistime간의 상호관계를 파악하는데 중점을 주었다.

[0°]로 적층한 GFRP의 경우 Table 3.에서 보는바와 같이 초기 크랙이 발생이 예상된 지점과 최종 파단이 일어난 지점에서는 AE 신호 중 energy의 값이 증가하는 경향을 보였으며, 그 사이에 발생하는 신호들은 뚜렷한 변화를 보이지 않았다.

[90°]로 적층한 GFRP의 경우에는 Table 4.에서 보는바와 같이 초기 균열이 발생했을 것이라 예상된 지점에서는 AE 파라미터 중 energy값이 증가하는 경향을 보였지만, 최종 파단이 일어난 지점에서는 감소하는 경향을 보였다. 이 실험결과를 통해 AE 파라미터 간의 상관관계를 살펴봄으로써 시편의 파괴 거동의 구분이 가능함을 확인하였다.

Table 3. [0°]16t 시편의 AE 데이터 분석 결과

	초기 크랙 발생 예상 지점		최종 파단 지점	
	Ch3	Ch4	Ch3	Ch4
Amplitude	증가	좌동	증가	좌동
Duration	급격한 증가	좌동	구간에 걸쳐 급격한 증가	좌동
Energy	증가 (일부 특이점에선 급격히 증가)	좌동	“	좌동
Counts	증가	증가	“	좌동
Risetime	증가 (일부 특이점에선 급격히 증가)	좌동	뚜렷한 경향 없음	감소

Table 4. [90°]16t 시편의 AE 데이터 분석 결과

	초기 크랙 발생 예상지점		최종 파단지점	
	Ch3	Ch4	Ch3	Ch4
Amplitude	증가	좌동	증가	좌동
Duration	급격한 증가	“	급격한 증가	“
Energy	증가	“	감소	“
Counts	증가	“	증가	“
Risetime	증가	“	증가	뚜렷한 경향 없음

##### 4.2 CFRP 복합재 시편 실험 결과

[0°]12t 시편은 Fig 9.과 같이 인장 시험기에서 얻은 Axial load와 Cumulative hits를 이용하여 시편의 거동이 변화하는 지점을 파악하였다.

Fig 9.를 보면 화살표로 표기된 51s 부근에서 첫 Hit가 발생하였으며, 이 시점이 Matrix micro cracking이 발생한 것으로 판단하였다. 이후 발생한 신호들을 살펴보면 총 14개의 지점에서 Cumulative counts 값이 증가하면서 Axial load 값이 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나는 지점이 존재하였는데(Fig 10.참조) 이 지점에서 섬유/모재간의 debonding이 발생하였다.

또한, 이러한 경향성을 바탕으로 향 후 실구조물에서 나타나는 AE 신호로 결함발생 여부를 판단할 수 있는 데이터를 확보하기 위해 Cumulative counts가 증가하면서 Axial load 값이 감소하는 시점에서의 다른 AE 파라미터 값들을 정렬해보았다. 그 결과 Counts 100이상, Frequency centroid 0, Amplitude 90이상, Duration 8000이상의 값을 보였으며,

ASL(Average Signal Level)과 RMS(Root Mean Square)가 급격하게 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

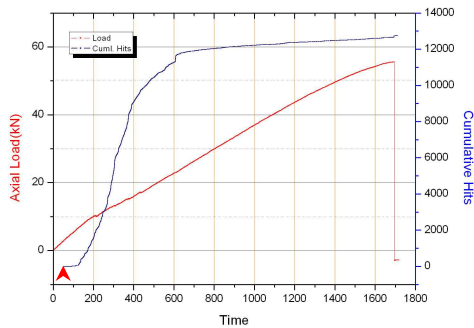
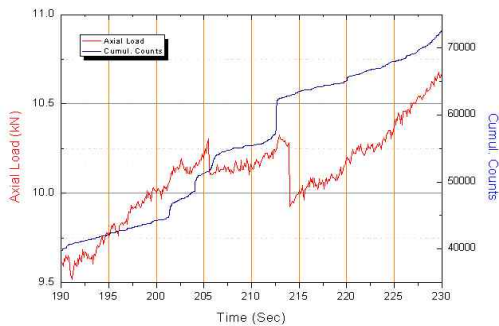
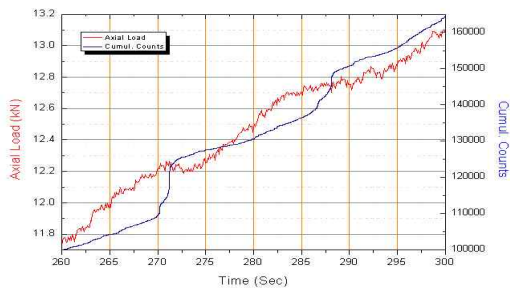


Fig. 9 Axial load, Cumulative Hits vs Time



a) 300~340s 구간

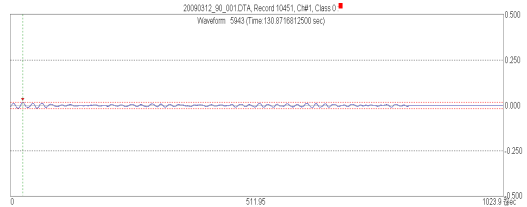


b) 420~460s 구간

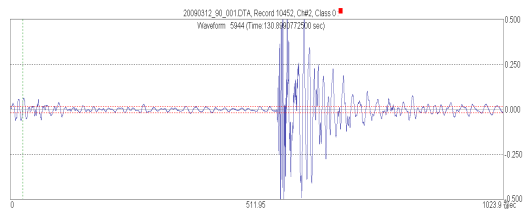
Fig. 10 Axial load, Cumulative count vs Time

[90°]12t 시편의 경우는 Axial load, Cumulative Counts vs Time 그래프에서 특별한 경향성을 파악할 수 없어 음향파형(waveform) 분석을 실시하였다. 그 결과 Fig 11.의 돌발형 음향파형 신호가 발생하

는 지점에서 Matrix cracking이 발생하였다. 돌발형 음향파형은 27개가 발생하였으며, AE 파라미터를 살펴본 결과 Amplitude 65이상, Frequency centroid 110이상의 값을 보였다. 향후 열화상 카메라를 사용하여 파단 시 발생하는 열적 상태 변화와 음향방출 신호와의 비교분석을 실시하여 결함 발생 시 AE 파라미터의 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.



a) 연속형 음향파형 신호



b) 돌발형 음향파형 신호

Fig. 11 음향파형 신호의 종류

## V. 결론

본 연구에서는 GFRP 및 CFRP 복합재 시편에 대한 인장실험을 진행하면서 파괴거동에 따라 발생하는 AE 신호의 특성에 대한 연구를 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AE 파라미터간의 상관관계를 통해 복합재 시편의 파괴 거동 변화를 확인할 수 있다.
2. [0°] CFRP 복합재 시편의 경우 섬유/모재간의 debonding이 발생하는 시점에서 Counts 100이상, Frequency centroid 0, Amplitude 90이상, Duration 8000이상의 값을 보였으며 ASL(Average Signal Level)과 RMS(Root Mean Square)가 급격하게 증가하였다.
3. [90°] CFRP 복합재 시편의 경우 Matrix cracking 이 발생하는 시점에서 돌발형 음향파형과 Amplitude 65이상, Frequency centroid 110이상의

값을 보였다. 향후 IR(적외선 열화상)카메라로 육안 관찰을 실시하여 AE 신호와 비교하는 분석을 진행할 예정이며, 그 결과를 바탕으로 추후 진행할 모형 항공기에서의 신호획득뿐만 아니라, 실제 항공기에서 CFRP 복합재가 사용된 부위에서의 균열 및 파단을 실시간으로 감지하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 항공우주부품기술개발 사업 및 한국연구재단 국가지정연구실(No. M20604005402-06B0400-40210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사합니다.

## 참고문헌

- [1] Jcantwell, W. J. and Morton. J., 1985, "Residual Strength Assessment of Impact Damaged CFRP Laminates", Proceeding of Int. Conf. Post-Failure Analysis of FIBER Reinforced Composites, Dayton, Ohio, Vol. 3, PP. 241~257
- [2] Malick, P. K., 1988, Fiber-Reinforced Composites, Marcel Decker, Inc., pp. 3~4
- [3] X. Lu, W. Sachse and I. Grabec, "Use of an automatic modeler and a small receiver array for acoustic emission (AE) source location", Ultrasonics, Vol. 36, No. 5, pp. 539~547, (1998)
- [4] L. Carlsson and B. Norrbom, "Acoustic emission from graphite/epoxy composite laminates with special reference to delamination", Journal of materials science, Vol. 18, No. 8, pp. 2503-2509 (1983)
- [5] J. Awerbuch, M.R. Gorman, and M. Madhundur, "Monitoring acoustic emission during quasi static loading unloading cycles of filament wound graphite epoxy laminate coupons", Materials Evaluation, Vol. 43, No. 6, pp.754-764 (1985)
- [6] M. Sergeant, E. Vanswijgenhoven, m. Wevers, O. Van Der Biest, "Acoustic Emission during Tensile Testing of SiC fibre reinforced BMAS glass ceramic composites", Composites Part A, Vol.28, no.5, pp.473-480 (1997)
- [7] Joung-Hwi Yoon, Sung-Oan Park, Zhang-Kyu Rhee, and Chang-Ki Woo "A Study on the Fracture Characteristics of CFRP by Acoustic Emission(1)" 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 283~288
- [8] 정희돈, 권영각, 장래웅, 용접부검사방법으로서의 Acoustic Emission, 대한용접학회지, 11-2,(1993) pp. 1~2
- [9] Sae-Kyoo Oh, Jung-Hwan Oh, Tae-Eun Jeon, Kyung-Kyoon and Myung-Suk Oh, "Real-Time Evaluation of Friction Weld Quality of Small-Type Hydraulic Valve Spool by Acoustic Emission", 대한 용접,접합학회지 제 12권 2호 (1994), pp.97~107