

## 論文

탄소섬유강화플라스틱(CFRP)의 인장하중하에서의 파괴거동에 따른  
음향방출신호 특성에 관한 연구

이경원\*, 이상윤\*, 남준영\*, 이종오\*\*, 이상율\*\*\* 이보영\*\*\*\*

A Study on the characteristics of the Signals of AE  
according to Fracture mode of CFRP under Tensile loadKyung-Won Lee\*, Sang-Yun Lee\*, Jun-Young Nam\*, Jong-Oh Lee\*\*, Sang-Yul Lee\*\*\*  
Bo-Young Lee\*\*\*\*

## ABSTRACT

Recently, aerospace structures have lightweight trend in order to reduce the cost of fuel and system, Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) can give the ability to reduce weight at 20~50% as the substitution of metal alloy, and there are advantages such as high Non-rigid, specific strength and anti-corrosion, but it is difficult to prove its destruction properties due to heterogeneous structure and anisotropy. In this study we designed specimen, inducing distinguishing destructions of material (for example, matrix crack, fiber breakage, and delamination) by using the Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) which is used in a real aircraft, to apply acoustic emission technique to aerospace structures. And we gained data via tensile testing and acoustic emission technique, from which each fault signal was classified respectively by using AE parameters and waveform.

**Key Words** : Acoustic Emission(음향방출: AE), AE parameter(음향방출 파라미터), Carbon Fiber Reinforced Plastic(탄소섬유강화플라스틱: CFRP), Waveform(파형), Fracture mode(파괴 유형)

## 1. 서 론

최근의 급격한 산업발전과 고도로 전문화된 산업사회에서 신소재 개발과 더불어 신소재의 응용과 적절한 사용이 무엇보다 중요시 되고 있다. 그 중 대표적인 탄소섬유강화 복합재료(이하

CFRP)는 1950년대에 연구가 시작되어 1980년대 부터는 구조용 재료로 사용되고 있다. 특히 금속 합금에 비해 20~50% 정도의 중량을 감소시킬 수 있다는 장점과 비강성, 강도 및 내부식성 등이 우수하기 때문에 항공기, 인공위성분야, 선박, 철도 및 자동차 등의 운송 분야, 스포츠용품, 의료 기기부품 등 다양한 분야의 구조용 재료로 사용되어지고 있다.[1,2]

특히 항공우주 구조물의 경우 연료 및 시스템 경비를 감소하기 위한 경량화추세에 있으며, 탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)은 금속합금을 대체할 수 있는 해결안으로 주목받고 있다.

하지만, 그 재료의 품질평가법이나 안전성, 신뢰

2010년 11월 20일 접수~2010년 12월 27일 심사완료

\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국기계연구원 부설 재료연구소

\*\*\* 한국항공대학교 항공재료공학과

\*\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : bylee@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

성에 대한 평가 기술은 아직 확립되어 있지 않고 있어, 이를 평가하기 위한 비파괴적인 검사방법의 정립이 시급한 실정이다.

현재 항공우주 구조물에 적용되고 있는 비파괴검사는 Fig. 1과 같으며, 대부분 계류 중 SRM(Structural Repair manual)의 절차에 따라 육안검사를 실시한 후 결함이 발견될 경우 실시한다. 하지만 이러한 방법들은 실제 운행 중에는 적용하기가 어렵다는 단점이 있다.



Fig. 1. 계류 중 항공기 비파괴검사 방법

하지만, 음향방출(Acoustic Emission: AE)방법의 경우 초음파 검사나 방사선 투시 검사와 같이 어떤 에너지를 주입하기 위한 인공적인 환경이 필요치 않으며, 고체 내부의 변화에 의해 발생한 탄성과 신호를 획득하여 검사하는 방법이기 때문에 가동상태를 유지하면서도 결함의 발생이나 성장유무를 관측하는 것이 가능하다.

이에 본 연구에서는 항공우주 구조물에 음향방출기법을 적용하기 위한 기초연구로써 실제 항공기에 사용되고 있는 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)를 이용하여, 재료의 특징적인 파괴를 유도하는 시편을 제작한 후 인장시험과 음향방출방법을 이용하여 그 신호를 획득, 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1. Acoustic Emission 방법

음향방출(Acoustic Emission: AE)이란 고체 내부에 국부적으로 형성된 변형(Strain)에너지가 급격히 해소되면서 발행하는 탄성과, 또는 이를 응용하는 기술을 의미한다.[3] 이러한 탄성과(AE)는 표면까지 전파된 후 AE센서에 의해 탐지되고 전

기적 신호로 변환된다. 따라서 이 전기신호(AE신호)는 소성 변형, 균열의 발생과 성장, 마찰 기구, 개재물의 파괴 및 상변화(상변태) 등에 관한 중요한 정보를 담고 있으며 적절한 처리를 거쳐 발생원의 실체를 규명하는데 사용될 수 있다.

음향방출의 장점으로는 결함탐지 감도가 매우 높으며( $10^{-12}$ m), 대상체의 구조나 결함의 크기·방향 등에 구애 받지 않고 가동 중 실시간 검사가 가능하다. 하지만, 대상체에 응력이 작용하는 동안에만 적용이 가능하며 방대한 데이터량으로 인해 결과 해석이 까다롭다는 단점이 있다.

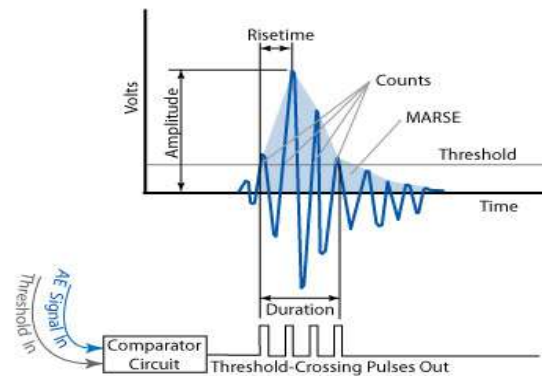


Fig. 2. AE parameter

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 사용된다. 즉, 미소결함 검출과 동시에 파괴기구의 해석 및 구조물이나 부품의 제조 중(출하 검사)이나 공정 중 비파괴 검사수단으로써 이용된다.[4] 음향방출 시험 시 나타나는 신호들을 분석하기 위해 사용되는 파라미터에는 Amplitude, Counts, Energy(Marse), Duration, Risetime[Fig. 2. 참조]등이 있으며, waveform 형태 및 주파수 분석과 병행하여 그 특징을 파악한다.

## 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 1와 같다.

시편은 Fiber breaking, Matrix cracking, Delamination유도 시편으로 총 3가지 종류의 결합 유도 시편을 핸드 레이업 방식으로 적층한 후 오토클레이브에 넣어 경화시켰으며 경화 사이클은 다음의 Fig. 3과 같다.

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

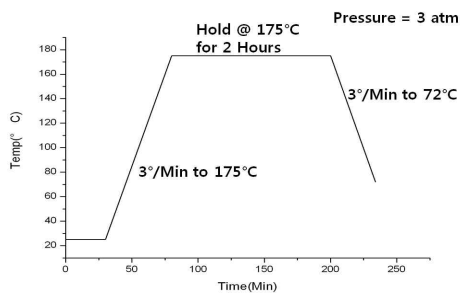


Fig. 3. CFRP의 Cure Cycle

Fiber breaking유도 시편은 에폭시 내부에 탄소섬유를 삽입한 형태이며, 시편 중앙부위는 탄소섬유를 외부로 노출시키도록 제작하였다. Matrix cracking 유도 시편은 CFRP 프리프레그를 [90°]12t, [0°]12t로 적층하여 제작하였으며, Delamination유도 시편은 CFRP 프리프레그를 [±45°]12t로 적층한 후 6t 지점에 AF167-17t 어드헤시브 필름 삽입 및 중앙부위의 두께가 시편 두께의 1/2이 되도록 라운드 형태로 가공하였으며, 각 시편의 제작 개요도는 다음의 Fig. 4와 같다.

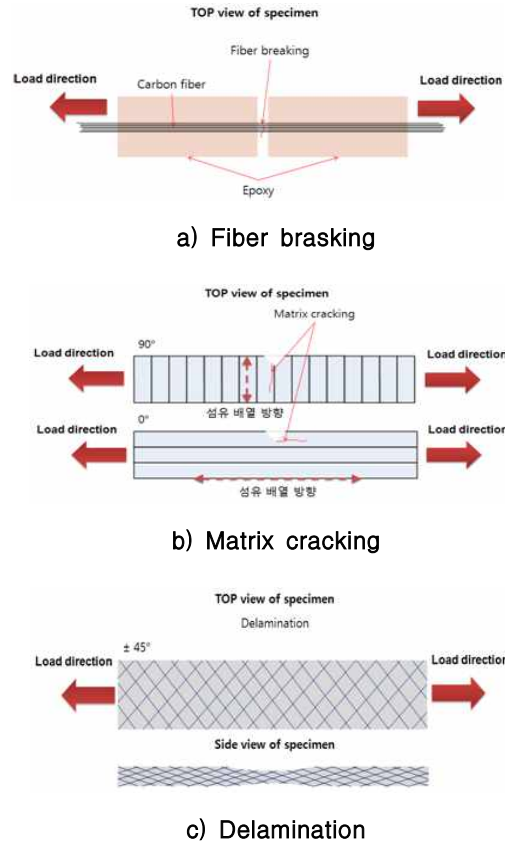


Fig. 4. 복합재료 시편 제작 개요도

Tab은 SK chemical 사의 GFRP 프리프레그 SKY FREX-UGN150를 이용하여, [+45°/-45°]16t 적층방법으로 제작하였고, Tab과 시편의 접착은 Loctite hysol 1C를 사용하였으며, 오븐에 넣어 60°C환경에서 2시간동안 경화시켰다. 시편과 tab은 ASTM D 3039에 나타난 규격을 따라 제작하였으며(Fig. 5참조) 완성된 시편 및 센서 부착 모습은 다음의 Fig. 5와 같다.



Fig. 5. 복합재 인장시편의 규격 및 센서부착위치

### 3.2. 실험 방법

실험은 MTS-810 인장 시험기를 이용하여 진행하였다. 센서와 시편사이에는 AE신호 획득 시 발생하는 노이즈를 최소화시키기 위해서 진공 구리스를 접촉매질로 사용하여 압착시켰으며, tape를 이용하여 고정시켰다. 시험장치의 개략도는 Fig. 6과 같으며, Fig. 7은 인장 시험기에 시편이 장착된 모습을 보여주고 있다.

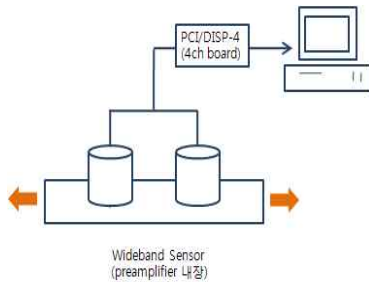


Fig. 6. 실험장치의 개략도



Fig. 7 실험장치의 개략도

하중 인가속도 2.0mm/min 변위제어 방식으로 실시하였으며, 시편의 파단 위치를 제어하기 위하여 시편에 인위적으로 노치를 주었다. AE신호 획득을 위해 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.

### 3.3. 분석 방법

획득된 신호는 시험편의 규격 및 센서위치를 상용 프로그램에 입력하여 AE신호 발생위치와 매칭시킨 후 결함발생 위치에서 발생한 신호만을 획득하는 Source location method를 이용하여 1차로 노이즈를 제거하였다.

또한, 가동되지 않고 있는 상태에서의 발생하는 신호를 기준으로 하여 Energy 파라미터의 값이 5이하의 값은 전기적인 노이즈로 판단하여 2차로 노이즈를 제거하는 방법으로 신호특성 파악에 유효한 신호만을 획득하였다.

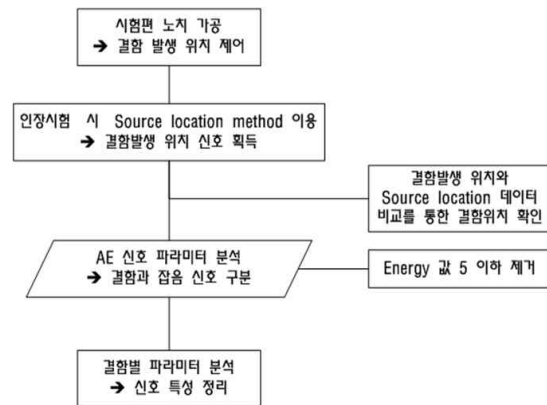


Fig. 8. 신호 분석 개요도

필터링 후의 신호들은 AE파라미터 별 수치뿐만 아니라, Duration vs Amplitude 그래프를 통해 신호의 종류별로 분포하는 위치를 파악하여 분류하였으며, 실험의 순서는 다음의 Fig 9.와 같이 진행하였다.

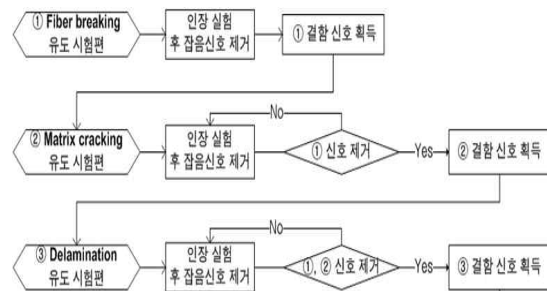


Fig. 9. 실험 순서

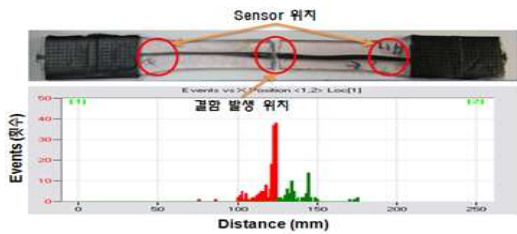
### IV. 실험결과 및 고찰

#### 4.1. 결함 종류별 신호 분석 결과

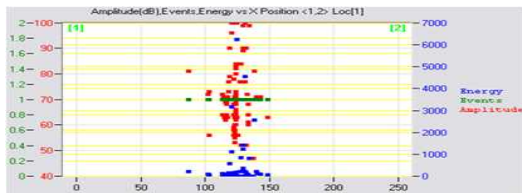
1차 필터링을 통하여 전체 신호에서 80%이상의 신호를 제거하여 분석에 유효한 신호를 획득할 수 있었으며, 2차 필터링을 한 후의 신호를 통해 결함 종류별 신호의 특징을 확인할 수 있었다.

신호 구분에 사용한 파라미터는 Amplitude, Risetime, Duration, Peak frequency이며, 각각의 단위는 dB,  $\mu$ s,  $\mu$ s, kHz, kHz이다.

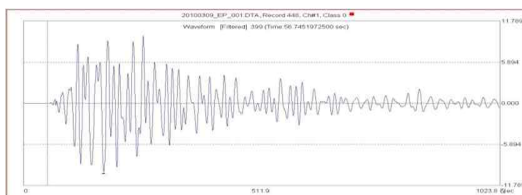
##### 4.1.1. Fiber breaking



(a) Source location method 모습



(b) 2차 필터링 결과

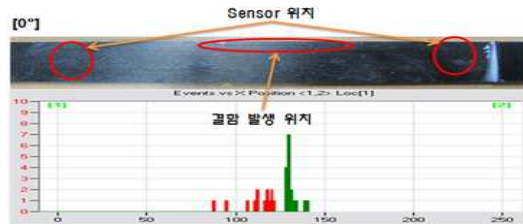


(c) Waveform

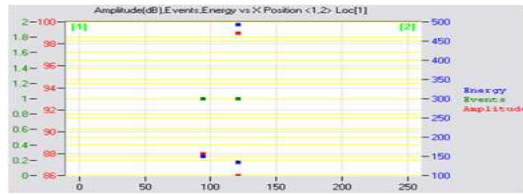
Fig. 9. Fiber breaking 유도시험편 실험 결과

Fiber breaking은 불연속적으로 일어나며, 각각의 섬유가 취성과파괴의 형태를 보이기 때문에 AE 파라미터 중 Amplitude가 높은 고진폭의 돌발형 waveform 신호가 획득되었다. 이때의 AE신호는 Fig 9.와 같으며 Amplitude 80이상, Risetime 20 이하, Duration 2000~7000, Peak Frequency 40~70의 수치를 보였다.

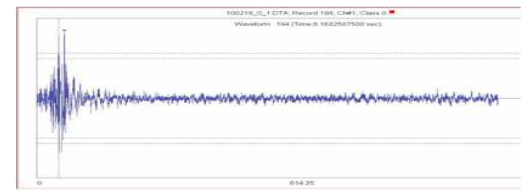
##### 4.1.2. Matrix cracking



(a) Source location method 모습



(b) 2차 필터링 결과

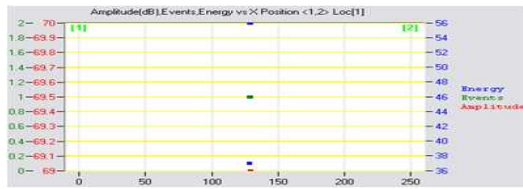


(c) Waveform

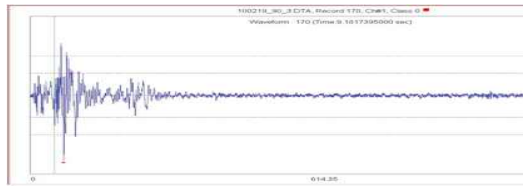
Fig 10. Matrix cracking 유도시험편 ([0°]12t) 실험 결과



(a) Source location method 모습



(b) 2차 필터링 결과



(c) Waveform

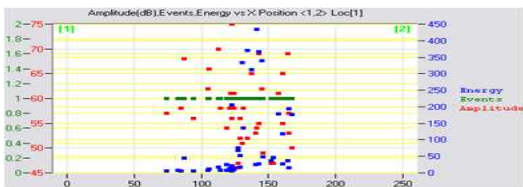
Fig 11. Matrix cracking 유도시험편 ([90°]12t) 실험 결과

Matrix cracking은 [0°]12t와 [90°]12t 2가지 시험편으로 신호를 획득하였다. 균열은 모두 시험편의 노치 부위에서 발생하였으며, 섬유배열 방향으로 진전하였다. 획득된 신호는 Amplitude 60이하, Risetime 20이하, Duration 10~60, Peak Frequency 40~70이며, 돌발형 Waveform을 보였다.

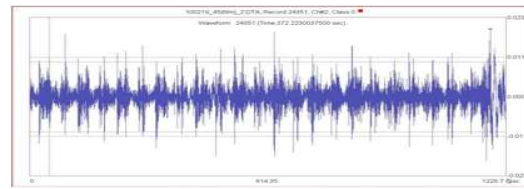
4.1.3. Delamination



(a) Source location method 모습

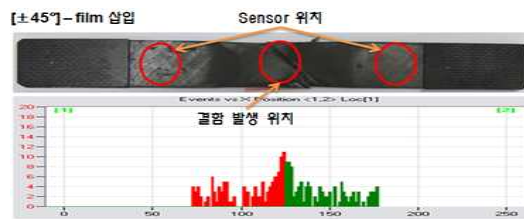


(b) 2차 필터링 결과

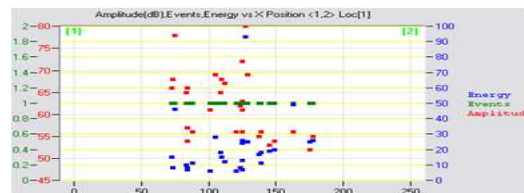


(c) Waveform

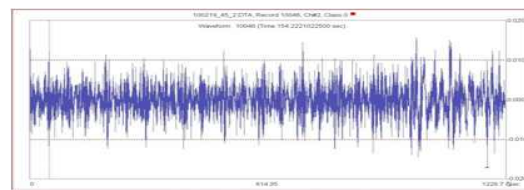
Fig. 12 Delamination 유도시험편 ([±45°]12t) 실험 결과



(a) Source location method 모습



(b) 2차 필터링 결과



(c) Waveform

Fig. 13 Delamination 유도시험편 ([±45°]12t\_adhesive film 삽입) 실험 결과

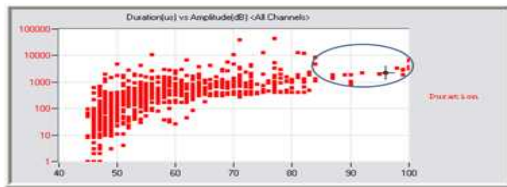
Delamination은 [±45°]12t와 [±45°]12t(adhesive film삽입) 2가지 시험편으로 신호를 획득하였다. 또한, Fiber breaking 과 Matrix cracking이 함께

발생하기 때문에 앞서 실시한 실험결과를 바탕으로 각각에 해당하는 신호를 제거하였으며, 획득된 신호는 Amplitude 64~80, Risetime 205이하, Duration 5500~12000), Peak Frequency 50~225이며 다른 신호와는 달리 연속형 Waveform 신호가 획득되었다.

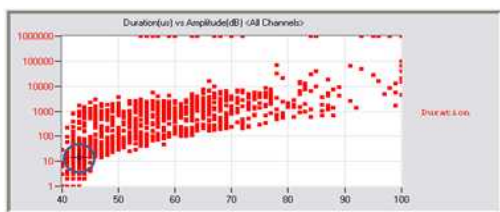
Table 2. AE 신호 결과

	Fiber breaking	Matrix cracking	Delamination
Amplitude	80이상	60이하	64~80
Duration	2000~7000	10~60	5500~12000
Peak Frequency	40~70	40~70	50~225
Risetime	20이하	20이하	205이하
Waveform 형태	돌발형	돌발형	연속형

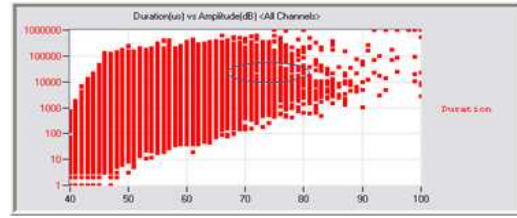
파괴 모드별로 획득된 신호를 요약하면 table 2와 같으며, Peak Frequency, Risetime, Waveform 형태의 경우 Fiber breaking, Matrix cracking 이 각각 40~70, 20이하, 돌발형으로 동일한 결과를 보였으며, Delamination은 다른 2가지의 파괴모드와는 달리 50~225, 205이하, 연속형으로 그 수치 및 waveform 형태가 큰 차이를 보였다.



(a) Fiber breaking



(b) Matrix cracking



(c) Delamination

Fig. 14 파괴모드별 Duration vs Amplitude 그래프

또한, Amplitude는 각 파괴모드별로 60이하, 64~80, 80이상의 수치를 보였으며, Duration은 각각 2000~7000, 10~60, 5500~12000으로 수치의 범위가 다르게 나타났다. 이 두 파라미터를 하나의 그래프로 표현하면 Fig 14와 같으며, Fiber breaking시 발생하는 신호는 우측상단, Matrix cracking시 발생하는 신호는 좌측 하단, Delamination시 발생하는 신호는 중앙상단에 각각 존재하였으며, 이 그래프를 통해 결함 발생 시 필터링 후의 데이터의 분포 위치로 대략적인 파괴모드를 구분할 수 있었다.

향후, 이 실험을 통해 획득한 CFRP 복합재료의 파괴모드별 음향방출 신호 데이터를 이용하여, 동일한 재료를 사용한 실구조물의 안정성 및 상태를 진단하는 데이터로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 CFRP 복합재 시편을 인장하중하에서 특정파괴모드(Fiber breaking, Matrix cracking, Delamination)가 발생하도록 제작한 뒤 인장실험을 진행하며, 각각의 파괴거동에 따라 발생하는 AE 신호를 획득, 분석하여 하여 그 특성을 파악하는 연구를 진행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. AE 파라미터값을 이용하여 CFRP 복합재의 파괴 거동에 따른 특징을 구분할 수 있다.
2. Average Frequency, Duration, Amplitude 파라미터는 파괴모드 별로 그 값의 범위가 상이하여, 수치 및 Duration vs Amplitude 그래프를 통해 CFRP 복합재의 파괴모드를 구분하는데 유용하게 사용할 수 있다.
3. Peak Frequency, Risetime 파라미터와 Waveform 형태는 Fiber breaking,과 Matrix cracking과 유사한 결

과를 보였으며, Delamination의 경우에는 다른 두 가지 파괴모드와는 확연히 다른 결과를 보였다.

향후, 본 연구에서 얻은 결과를 활용하여, 실험 재료과 동일한 CFRP 복합재를 이용하여, 실구조물(모형항공기)을 제작하여 운행 중 발생하는 음향방출 신호를 획득할 예정이며, 그 결과를 바탕으로 동일한 재료가 사용된 실제 항공기 등의 구조물의 안정성 및 상태를 실시간으로 진단하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] Malick, P. K., 1988, Fiber-Reinforced Composites, Marcel Decker, Incc., pp. 3~4
- [2] A. Barchan, "Analysis of damage mechanics of unidirectional composites beams with acoustic emission method", Ultragarsas journal, Nr.4(61). 2006
- [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] 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
- [5] Fang Ming Zhao, Tomonaga Okabe, Nobuo Takeda 2000, "The estimation of statistical fiber strength by fragmentation tests of single-fiber composites", Composites Science and Technology 60(2000) 1965-1974
- [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] Ziola SM, Gorman MR. Source location in thin plates using cross-correlation. J Acoust Soc Am 1991;90:2551 - 6.
- [8] 정희돈, 권영각, 장래웅, 용접부검사방법으로 서의

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