

## 論文

## Al 7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 미세적 파괴특성에 대한 AE특성평가

이진경<sup>\*,</sup>, 이준현<sup>\*\*</sup>, 윤한기<sup>\*</sup>

## Evaluation of AE Characteristics on Microscopic Fracture Mechanism of Al7075/CFRP Hybrid Composite

J. K. Lee<sup>\*,</sup>, J. H. Lee<sup>\*\*</sup>, H. K. Yoon<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

When compared to other composite materials such as FRP and MMC, hybrid composite material is more attractive one due to the high specific strength and the resistance to fatigue. However, the fracture mechanism of hybrid composite material is extremely complicated because of the bonding structure of metals and FRP. Recently, nondestructive technique has been used to evaluate the fracture mechanism of these composite materials. In this study, AE technique has been used to clarify the fracture mechanism and the degree of damage for Al 7075/CFRP hybrid composite material. It was found that AE event, energy and amplitude among AE parameters were effective to evaluate fracture process of Al 7075/CFRP composite material. In addition, the relationship between the AE signal and the characteristics of failure surface using optical microscope was discussed.

## 초 록

하이브리드 복합재료는 FRP나 MMC와 같은 복합재료에 비하여 높은 비강도, 내피로 특성을 가지고 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 그러나 하이브리드 복합재료는 금속과 FRP의 결합구조로 되어있기 때문에 매우 복잡한 파손기구를 가지고 있다. 최근에는 비파괴 기법을 이용하여 이러한 복합재료의 파손기구를 평가하고자 하는 연구가 수행되어지고 있다. 본 연구에서는 음향방출 기법을 이용하여 Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료에 대한 손상정도 및 파손기구를 명확히 하고자 하였다. 특히 AE 사상수, 에너지, 진폭과 같은 AE 파라미터들은 Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 파손과정을 평가하는데 효과적이었다. 더불어, 광학현미경을 이용하여 AE 신호와 시험편의 표면손상 특성과의 관계를 비교, 검토하였다.

## 1. 서 론

최근 첨단과학 분야가 날로 발전함에 따라 역학적, 열적, 전자기적, 화학적 등의 우수한 재료 특성을 가진 신소재를 필요로 하는 분야가 급격히 증가하고 있다. 그러나 금속재료는 근본적으로 이와 같은 재료적 특성을 향상시키기에는 많은 문제와 한계성을 가지고 있기 때문에 새로운 복합재료에 대한 요구가 날로 증가하고 있다.

현재 항공기 재료의 대부분을 차지하고 있는 알루미늄 합금은 경량성, 신뢰성 및 경제성 등의 이점 때문에 예로부터 항공기 재료로 많이 사용되어져 왔으나, 내식성, 비강도 및 내피로 특성에 한계가 있어 이를 보완하기 위해 섬유강화 복합재료의 사용이 증가하고 있다. 그러나 섬유강화 복합재료도 수작업에 의존해야 하는 작업공정성의 문제와 약한 내충격성, 흡습성, 열충격 등으로 인해 사용에 커다란 제약을 받고 있는 실정이다. 따라서 위와 같은 문제

\*+ 동의대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:leejink@donggeui.ac.kr)

\*\* 부산대학교 기계공학부

점을 개선하기 위해 최근 선진국에서는 차세대 항공기용 재료로 알루미늄 박판과 섬유강화 복합재료를 적층한 하이브리드 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-4]. 하이브리드 복합재료 가운데 Al 7075/CFRP 하이브리드 복합재료[5]는 뛰어난 비강도 및 내피로 특성 등으로 인해 차세대 항공기용 소재로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 이러한 금속/섬유 하이브리드 복합재료는 이중 소재의 결합에 의한 복합구조를 가지므로 재료 특유의 이방성과 불균일성 또는 제작과정에서 발생하는 여러 가지 형태의 결함을 내재할 가능성이 크기 때문에 그 재료 특성의 이론적 해석이 어렵고, 섬유의 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 결함 및 재료의 손상정도를 정량적으로 평가하려는 연구들이 보고되고 있다. 특히 음향방출 기법[6-8]은 복합재료의 파손기구 및 손상정도를 정량적으로 평가하는데 매우 유용하게 적용되고 있다.

복합재료의 손상거동에 대한 음향방출 기법의 유용성 때문에 Wevbers[9] 등은 피로하중을 받는 CFRP의 피로손상을 AE를 이용하여 평가하였고, Takahashi[10] 등은 3점 굽힘하중을 받는 CFRP의 파괴과정 및 AE 특성을 비교하였다. 또한 윤[11-12] 등은 알루미늄/CFRP를 다적층한 CRALL재를 제작하여 인장강도와 피로수명의 특성에 대하여 보고하였다. 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 하였다. 또한 광학현미경을 이용하여 시험편의 파단면과 그에 따른 파단양상을 관찰하여 복합재료의 손상정도에 따른 AE 신호특성과 비교, 검토하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

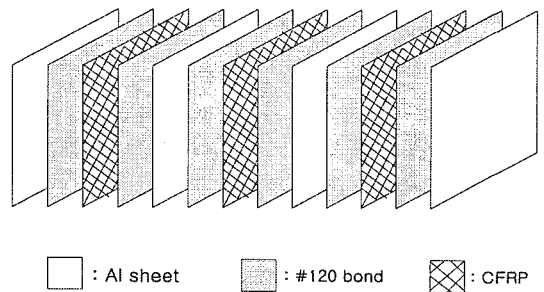
본 연구에서 사용된 Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 시험제작에 사용된 소재는 알루미늄 합금 Al 7075-T6(QQ-A-250/13E)와 고탄성 탄소강화섬유 HE CFRP (Torayca M40)를 사용하였다. 알루미늄 합금은 두께 0.7mm의 얇은 박판으로 판표면에 엘클래드(alclad) 처리한 QQ-A-

250/13E로 통용되는 제품이며 다적층재로 사용한 탄소강화섬유의 플라이 두께는 0.3mm이며 사용된 접착제는 에폭시(epoxy) 250°F #2560을 사용하였다. Table 1에서는 이들 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

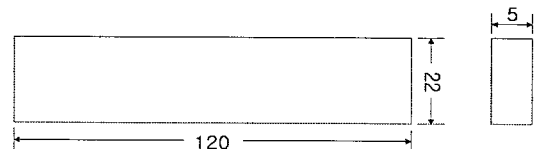
알루미늄판의 표면처리는 크롬산 산화피막처리(Chromic Acid Anodizing, CAA)를 하였다. 접착공정은 준비된 프리프레그(prepreg)를 [45°/-45°]로 적층한 후 오토클레이브(autoclave) 시험기에서 Fig. 1과 같이 알루미늄과 CFRP를 교대로 적층하여 성형하였으며, 시험편의 규격은 120×22×5mm로 정하였다. 성형조건은 Fig. 2와 같이 1.5°C/min의 승온속도로 120°C까지 승온한 후, 0.34MPa 압력에서 120분간 유지하였다. 성형이 완료된 후시험편의 힘을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 2°C/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하여 시험편을 제작하였다.

Table 1 Mechanical properties of epoxy, CFRP and aluminum

Properties Material	Resin system	CFRP (45°)	Al 7075
Tensile strength(MPa)	55~120	230	483
Yield strength(MPa)	-	-	414
Modulus(GPa)	3.1~4.7	32	71
Fracture strain(%)	2.0~3.5	4.5	12
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.85	1.85	2.79



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Schematic structure and (b) dimension of specimen.

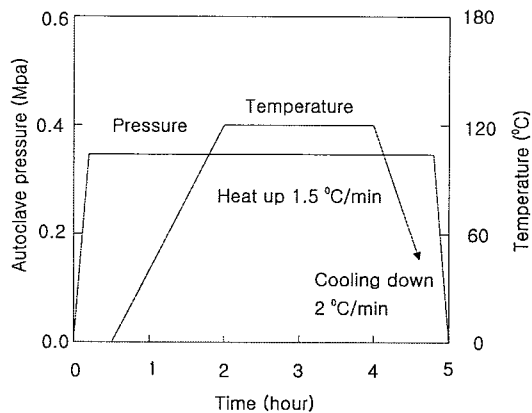


Fig. 2 Pressure and temperature conditions for specimen manufacture.

## 2.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 AI 7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 하중 증가에 따른 손상 정도를 비파괴적 기법을 적용하여 평가하기 위해 시험편에 AE 센서를 부착하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다.

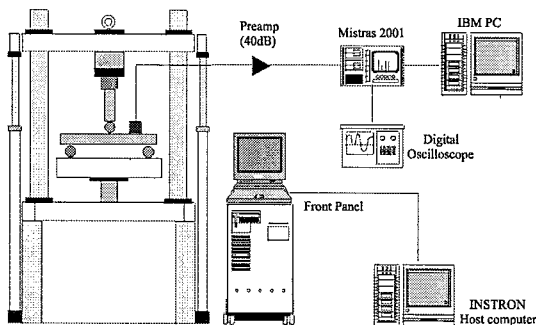


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up.

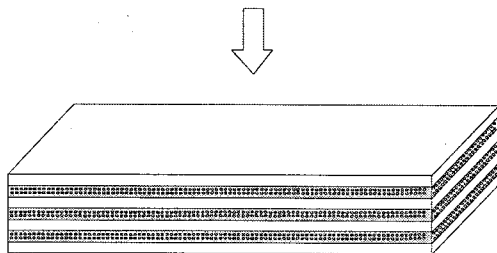


Fig. 4 Load direction of flat-wise.

Fig. 3은 전체적인 실험장치의 개요도를 나타낸 것으로 시험편 정면에 광대역 AE 센서(WD, 100~1200kHz)를 부착하여 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 오실로스코프(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, 양지지점 사이의 거리는 100mm로 정하였다. 그리고 주위의 잡음을 제거하기 위하여 문턱전압값은 17.8mV로 설정하였으며 광학현미경(Olympus)을 사용하여 시험편의 파단면과 그에 따른 파단양상을 관찰하여 시험편의 손상정도에 따른 AE 신호 특성과 비교, 검토하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 하중에 대한 미시적 변형거동 및 AE 특성

Fig. 5는 하중이 증가함에 따라 발생하는 AE 사상수의 변화특성을 나타낸 것으로 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, 하중곡선이 비선형을 보이며 AE 사상수가 거의 일정하게 발생하는 III영역, 최대 하중점에서 급격한 AE 사상수의 증가를 보이다 점차적으로 감소하는 IV영역으로 나눌 수 있다.

먼저 탄성영역 초기의 I영역에서는 하중초기에는 AE 사상수가 발생하지 않지만 점차적으로 하중이 증가하여 II영역에 도달하게 되면 따라 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. 8(a)의 광학현미경을 이용한 표면관찰 결과 CFRP에서의 에폭시의 균열발생 및 성장을 관찰할 수 있었다. 한편 하중이 증가하여 III영역으로 진행하면 복합재료의 소성변형에 의해 하중곡선이 비선형을 나타내며 에폭시에서 발생한 균열들이 성장하고 서로 합체(link-up)하여 내부로 전파하며 또한 기지재인 알루미늄의 소성변형에 의해 AE 사상수는 30여개 정도로 일정하게 발생하는 경향을 나타낸다. 그러나 III영역의 최대하중점에 도달하게 되면 현저한 AE 사상수의 증가

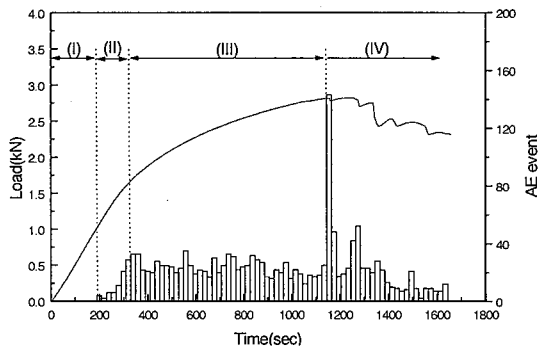


Fig. 5 Load and events versus time.

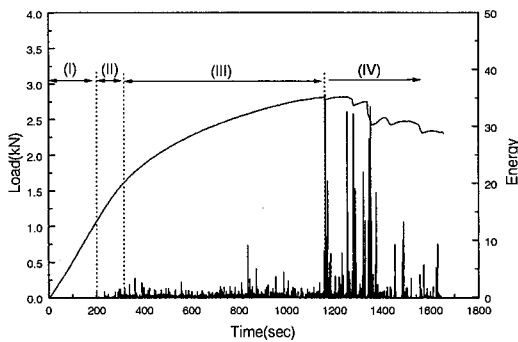


Fig. 6 Load and energy versus time.

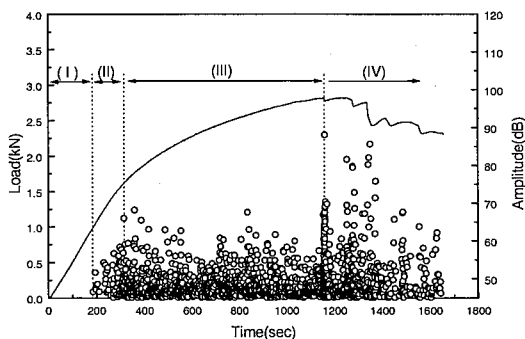


Fig. 7 Load and amplitude versus time.

를 보이며, 이때 시험편은 CFRP의 층간분리 현상이 발생하게 된다. 그리고 이러한 층간분리가 발생한 후 시험편은 더 이상 하중을 지탱할 수 없는 실질적인 파괴에 도달하게 되며 층간분리 현상이 증가함에 따라 하중과 AE 사상수는 점차적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 6은 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 크기 및 방향 등에 의해 II, III영역보다 현저히 높은 10이상의 높은 에너지레벨을 나타내는 신호가 다수 발생하였다.

Fig. 7은 하중의 증가에 따른 AE 신호의 진폭의 변화를 나타낸 것으로 탄성영역인 II영역에서는 에폭시의 미소균열의 발생에 의해 60dB이하의 낮은 진폭의 AE 신호가 발생하지만 III영역으로 진행하면 발생한 미소균열들의 성장 및 합체에 의해 II영역보다 다소 높은 60-70dB의 진폭을 나타내는 신호가 발생한다. 그러나 IV영역의 층간분리 발생시에는 70dB 이상의 고진폭의 신호가 다수 발생하며 Fig. 6의 에너지의 변화에서 II, III영역의 낮은 에너지레벨과 IV영역의 높은 에너지레벨을 나타내는 것과 비슷한 경향을 나타내었다.

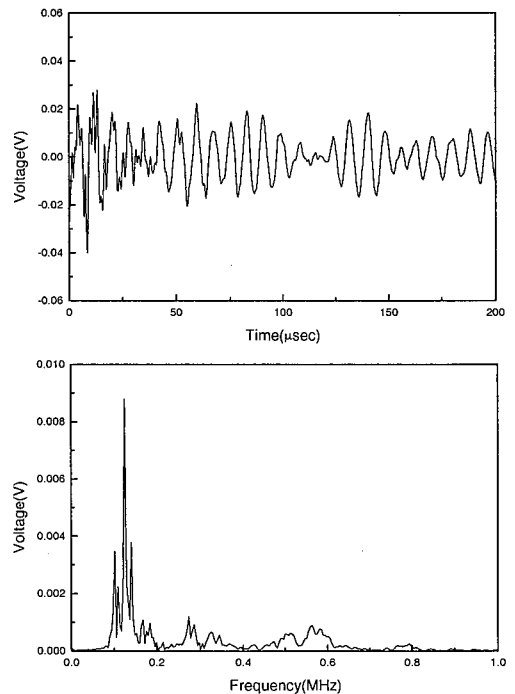


Fig. 8 Typical example of waveform and spectrum corresponding to epoxy cracking.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 Al7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 플랫폼방향으로 하중을 가하였을 경우 각각의 영역에서 발생하는 AE 신호들의 여러 인자들이 서로 다른 특성을 나타내기 때문에 이를 분석함으로써 하이브리드

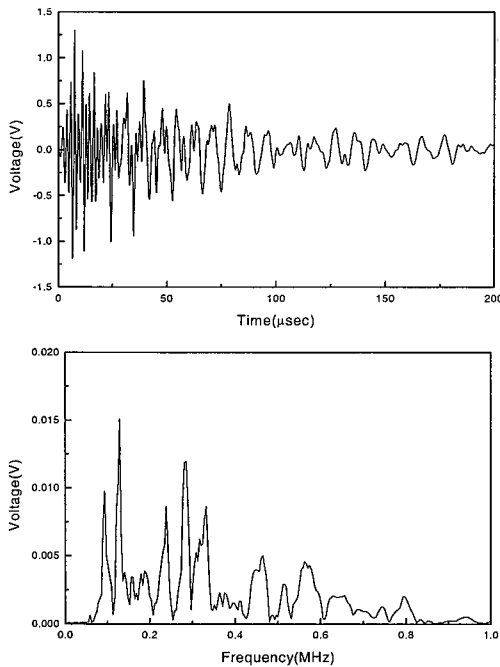


Fig. 9 Typical example of waveform and spectrum corresponding to delamination of CFRP.

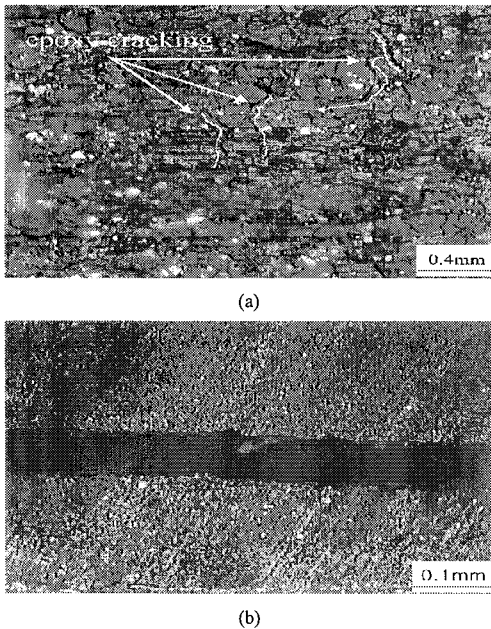


Fig. 10 (a) Epoxy cracking and (b) delamination from optical microscope.

복합재료의 손상정도를 평가하는데 있어서 AE 기법이 유효함을 알 수 있다. Fig. 8에서는 하이브리드 복합재료의 미시적 손상에 대한 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로 에폭시에 균열이 발생할 때에는 그림에서 보여주는 바와 같이 연속형 신호로서 주파수 대역은 100-150kHz를 나타내었으며 CFRP와 알루미늄과의 층간분리시에는 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 고진폭의 돌발형 신호와 120kHz와 280kHz에서 최대진폭의 주파수 특성을 나타내었다. Fig. 10에서는 주파광학현미경을 이용하여 각 영역에서 복합재료의 손상정도를 관찰한 것으로 Fig.10(a)는 II, III영역에서 에폭시미의 파단 및 성장을 관찰할 수 있었으며 Fig.10(b)는 IV영역에서 CFRP의 층간분리현상을 나타낸 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 휨 거동을 하는 AI 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 발생하지않는 I 영역
  - ii) 점차적인 하중증가와 더불어 에폭시에서의 균열이 발생하여 AE 사상수가 소수 발생하는 II영역
  - iii) 하중증가와 더불어 발생한 미소균열 성장 및 합체에 의해 AE 사상수가 일정한 III영역
  - iv) CFRP의 층간분리에 의해 현저한 AE 사상수의 증가를 보이는 IV영역
2. AI 7075/CFRP 하이브리드 복합재료의 파괴기구를 규명하는데 있어서 음향방출기법을 적용하여 그 타당성을 평가한 결과 AE 사상수, 에너지, 진폭 등과 같은 AE 인자들을 통하여 복합재료의 손상정도 및 파괴특성을 평가하는데 있어서 매우 유용함을 알 수 있었다.
3. 에폭시의 균열에 의한 신호는 낮은 에너지와 낮은 진폭의 신호로서 지속시간이 긴 파형 형태를 나타내며 100-150kHz의 주파수 범위를 나타내었다. 그러나 층간분리시 발생하는 신호는 매우 고진폭의 신호로서 120kHz, 280kHz에서 최대 진폭을 나타내었다.

#### 참고문헌

- 1) C. T. Lin and P. W. Kao, "Fatigue Delamination Growth in Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Laminates,"

- Composites*, Vol. 27A, No. 1, 1996, pp. 9~15.
- 2) R. Marissen, "Flight Simulation Behaviour of Aramid Reinforced Aluminum Laminates(ARALL)," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 2, 1984, pp. 261~277.
  - 3) J.W. Gunnink, L. B. Vogelesang, "Toward the Supportable and Durable Aircraft," *20th International SAMPE Technical Conference*, 1988, pp. 605~606.
  - 4) C. T. Lin, P. W. Kao and F. S. Yang, "Fatigue Behaviour of Carbon Fiber-Reinforced Aluminium Laminates," *Composites*, Vol. 22, No. 2, 1991, pp. 135~141.
  - 5) 이제현, 김영환, 윤한기, "항공기 구조용 하이브리드 복합재료(ARALL, CARALL)의 제조와 특성," *대한금속재료학회지*, 제38권, 제1호, 2000, pp. 91~97.
  - 6) J. H. Lee, D. J. Yoon, O. Y. Kwon, "Acoustic Emission Monitoring of Fracture Process of SiC/Al Composite Materials," Seattle, U.S.A, 1992, pp. 300~309.
  - 7) 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar 재료의 미시적 파손거동에 관한 연구," *콘크리트학회지*, 제10권, 6호, 1997, pp. 203~211.
  - 8) 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온라인 모니터링," *한국비파괴검사 학회지*, 제19권, 1호, 1999, pp. 25~33.
  - 9) M. Wevers, I. Verpoest, E. Aernoudt, P. De Meester, "Analysis of Fatigue Damage in CFRP Epoxy Composites by Means of Acoustic Emission: Setting Up a Damage Accumulation Theory," *The Second International Conference on Acoustic Emission*, 1986, pp. 186~190.
  - 10) Masaru Takahashi, Hidehiko Tanaka, Kohichi Tamura, Seiichio Tomoura, "Fracture Process and AE Characteristics of CFRPs During Three Point Bending Test," *Progress in Acoustic Emission 2*, JSNDI, 1989, pp. 450~457.
  - 11) H. K. Yoon, K. B. Lee, S. W. Oh, "Strength Evaluation on Al7075/CFRP Multilayered Hybrid Composite Material," *Proc. of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength 96*, 1996, pp. 497.
  - 12) 윤한기, 김연겸, 박준수, 이경봉, "Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 피로수명에 관한 연구," *한국해양공학회 추계학술대회 강연논문집*, 1996, pp. 97~106.