

매트릭스형 피에조센서를 이용한 복합재료 AE신호 분석에 관한 연구

A Study on AE Signal Analysis of Composite Materials Using Matrix Piezo Electric Sensor

유연호*, 최진호**†, 권진회**

Yeun Ho Yu*, Jin Ho Choi**† and Jin Hwe Kweon**

초 록 섬유강화 복합재료가 항공기, 우주 구조물, 로봇 팔 등에 널리 사용됨에 따라 복합재료의 신뢰도와 안전성을 향상시키기 위하여 이에 대한 비파괴검사법은 매우 중요한 연구분야로 대두되고 있다. AE법은 복합재의 균열, 섬유 또는 수지재의 파손, 층간분리 등의 발생 및 성장과정에서 발생하는 탄성파로 인한 스트레인 에너지를 검출하는 방법이다. 본 논문에서는 8×8 매트릭스형 피에조 센서를 사용하여 인장시험 하에서 발생하는 AE신호를 측정하고 분석하였다. 이를 위하여 AE신호의 전달거리를 제어할 수 있는 전용회로를 설계하고 제작하였다. 또한 64채널의 AE신호를 획득하기 위하여 발광다이오드를 사용한 광학 저장장치를 구성하였다. 실험결과, 8×8 매트릭스형 피에조 센서를 이용하여 복합재료에서 발생하는 AE신호의 발생지점과 전파 경로를 효과적으로 검출할 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 매트릭스형 피에조 센서, 발광다이오드

Abstract As fiber reinforced composite materials are widely used in aircraft, space structures and robot arms, the study on non-destructive testing methods has become an important research area for improving their reliability and safety. AE (acoustic emission) can evaluate the defects by detecting the emitting strain energy when elastic waves are generated by the initiation and growth of crack, plastic deformation, fiber breakage, matrix cleavage, or delamination. In the paper, AE signals generated under uniaxial tension were measured and analyzed using the 8×8 matrix piezo electric sensor. The electronic circuit to control the transmitting distance of AE signals was designed and constructed. The optical data storage system was also designed to store the AE signal of 64channels using LED (light emitting diode) elements. From the tests, it was shown that the source location and propagation path of AE signals in composite materials could be detected effectively by the 8×8 matrix piezo electric sensor.

Keywords: Acoustic Emission, Matrix Piezo Electric Sensor, LED (Light Emitting Diode)

1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 감쇠특성과 충격특성이 우수하기

때문에 그 사용이 증가하고 있으며 응용분야도 다 변화되고 있다[1]. 그러나 복합재료는 구성섬유(직경 6 - 120 μm)의 크기가 다양하고 섬유와 모재의 특성이 재료마다 다를 뿐 아니라 재료내부에 손상이

발생하면 그 기계적 성질이 상당히 저하될 수 있다. 또한 복합재료의 제조과정에서 내부결함이 생길 수 있으며 사용 중에 가해지는 외부 하중이나 가혹한 환경에 의해 내부손상이 발생할 수 있다. 이들 손상은 복합재료를 이용한 기계 구조물의 신뢰성 및 안정성에 치명적 영향을 주게 된다. 손상 크기는 $0.1 \mu\text{m}$ - 수 mm로 다양하며 복합재료의 강도와 강성, 파괴인성에 큰 영향을 주는데, 재료의 신뢰성과 건전성의 관점에서 공학적으로 어느 정도까지 정량화가 가능하고 허용할 수 있는지 규정하는 것은 중요하다. 복합재료 구조물의 안정성과 신뢰성 평가를 위해서는, 손상의 발생 및 성장과정, 누적 손상과정 등을 고려한 복합재료의 미소역학적 해석을 통해 응력-변형을 관계를 규명할 필요가 있다. 또한 각종 비파괴검사법[2,3]을 활용하여 변형 및 손상의 변화과정을 실시간 검출하여 강도와 파괴인성, 잔여수명에 대한 영향을 평가할 필요가 있다. AE는 고체 내부에 축적된 스트레인 에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파로 그 파원이 균열의 발생/성장, 소성변형, 섬유파단, 기지균열, 층간분리 등에 있기 때문에 이를 측정하고 분석함으로써 발생원의 정체를 밝히는데 널리 사용되고 있다[4-6]. 복합재료는 탄성파의 전파속도가 서로 다른 두 가지 이상의 재료로 구성되어 있으므로, 단일 센서를 사용하여 탄성파의 위치와 진행방향을 측정하는 데는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 8×8 매트릭스(matrix)형 피에조 센서를 제작하고, 이를 이용하여 AE신호의 위치와 진행방향을 실험적으로 확인하였다. 8×8 매트릭스형 AE센서에서 나온 신호를 증폭하고 일정시간 간격으로 획득하기 위한 전용 분석회로를 설계, 제작하였으며, 증폭된 다 채널 AE 신호를 동시에 저장하기 위하여 발광 소자를 이용한 광학 기법을 도입하였다.

2. 복합재료 AE신호분석장치 개발

2.1. 복합재료 AE신호의 특성 및 주파수 선별

복합재료의 단순 인장시험에서 AE신호의 주파수를 분석하면, 200 kHz, 230 kHz, 400 kHz 등의 주파수 성분으로 복합재료의 섬유 파손 및 모재의 파손을 감지할 수 있다[7]. 본 논문에서는 신호의 진폭이 비교적 크고, 발생 빈도, 신호처리의 효율성을 고려하여 230 kHz 대역의 신호를 추출하여 AE특성

을 분석하였다. 230 kHz의 특정 주파수만을 획득하기 위해서 L(Coil) - C(Capacitance) 동조기를 사용하였다. 식 (1)은 L-C 동조기의 Cut Off Frequency, 식 (2)는 주파수에 따른 임피던스를 나타내는 식으로, L-C 동조기의 임피던스가 변화하여 특정 주파수만을 통과시킨다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$Z = j \frac{\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (2)$$

Fig. 1은 8×8 매트릭스형 피에조 센서에서 나온 신호를 약 50 dB로 증폭하고 L-C 동조기를 구성하여 제작한 회로의 사진이다.

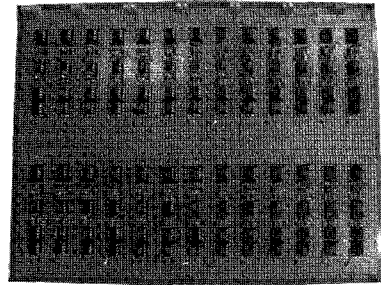


Fig. 1 Fabricated 64 channel amplifier

2.2. 매트릭스형 피에조 AE센서의 제작

AE신호의 위치와 진행방향을 실험적으로 확인하기 위하여 8×8 매트릭스형 AE센서를 제작하였다. Fig. 2는 제작된 매트릭스형 AE센서의 형상을 나타낸 그림으로, 약 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 의 정사각형 모양에 64개의 전극이 형성되어 있다.

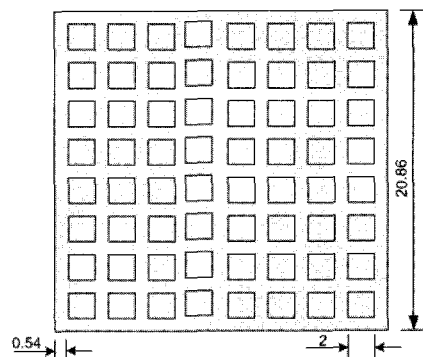


Fig. 2 Matrix type piezo sensor

2.3. 시험편 형상 및 광학데이터 저장장치

Fig. 3은 시험에 사용한 인장시험편의 형상과 크기를 보여주고 있다. 적층순서는 [45]₀이며, AE신호의 발생지점을 일정하게 고정시키기 위하여 시험편의 중앙부에 5 mm의 V-notch를 형성하였다. 시험편의 제작에 사용된 재료는 (주)SK의 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (USN125BX)이고, 최대 경화 온도는 120℃이다. 인장시험은 Instron 5582를 사용하였으며, 크랙이 발생하는 속도를 최소화하기 위하여 0.01 mm/min의 변위속도로 인장시험을 수행하였다.

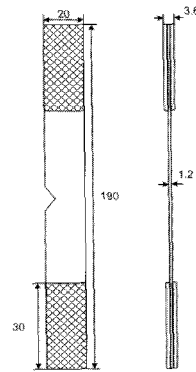


Fig. 3 Tensile test specimen with the V-notch

8X8 매트릭스형 피에조 센서에서 나온 64 채널의 신호를 동시에 저장하기 위해서는 데이터 처리 속도가 뛰어난 여러 개의 A/D 변환기를 사용해야 가능하며, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 과정에서 각 채널 간 시간지연현상이 발생하게 된다. 본 논문에서는 각 채널 간 신호의 시간지연을 방지하기 위하여 증폭된 각 채널의 AE신호를 발광다이오드(light emitting diode, LED)를 이용하여 광출력으로 저장하는 방법을 사용하였다. Fig. 4는 발광다이오드를 이용한 AE신호 저장방식의 개념도이다. 매트릭스형 센서에서 출력된 신호는 64 채널의 증폭기를 거쳐 발광다이오드에 의해 광출력으로 변환되며, 변환된 광신호는 필름을 감광시켜 신호의 크기를 저장하도록 구성되어 있다. 광신호를 필름에 감광시키기 위해서는 암실과 같은 환경이 필요하며, 본 논문에서는 카메라를 개조하여 이를 완성하였다. Fig. 5는 발광다이오드를 일정 간격으로 배치하고 필름과의 간격을 일정하게 유지하기 위한 하우징으로 일회용 카메라에 삽입하여 밀봉하였다. 1개의 하우징에 32개의 발광다이오드를 배치하고 일정 직경의 구멍을 가공하였으며, 총 2개의 개조된 카메라를 제작하였다. 매트릭스형 센서에서 나온 신호는 Fig. 4의 스위치를 이용하여 일정시간 동안 단속적으로 닫아주어야 AE신호의 발생위치와 전파방향을 측정할 수 있다. 따라서 매트릭스형 센서에서 나온 신호를 단속적으로 제어하기 위한 전용회로를 설계하여야 한다.

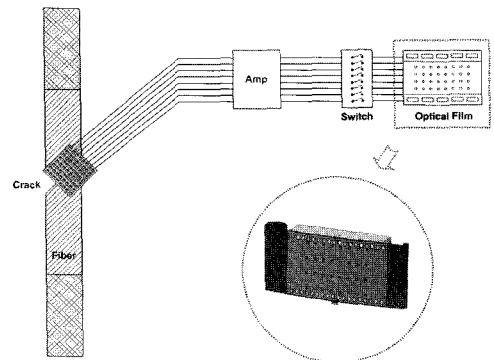


Fig. 4 Schematic diagram of the optical data storage

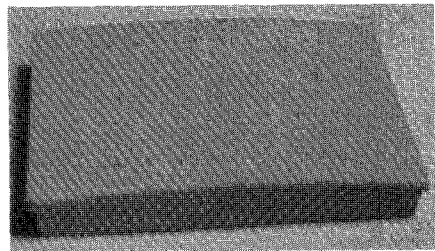


Fig. 5 Photograph of LED frame

2.4. AE신호 분석회로 구성

매트릭스형 센서에서 나온 신호를 단속적으로 제어하기 위하여 Fig. 6과 같은 제어회로를 구성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 64채널의 증폭기를

거친 신호는 OR-gate를 이용하여 Threshold Level Detector를 구성하였으며, 64 채널의 신호 중 일정 크기 이상의 신호가 1개 이상 출력되면 ON신호가 출력되도록 구성되어 있다.

출력된 ON신호는 Counter A로 보내어져 신호의 횟수를 카운트한다. Counter A와 OR-gate가 초기화되어 있을 경우, Counter 신호의 횟수가 일정 값 이하에서는 OR-gate로 OFF신호가 입력되며, 일정 값 이상에서는 ON신호가 입력되도록 구성하였다. OR-gate의 한쪽 입력단과 출력단은 서로 연결

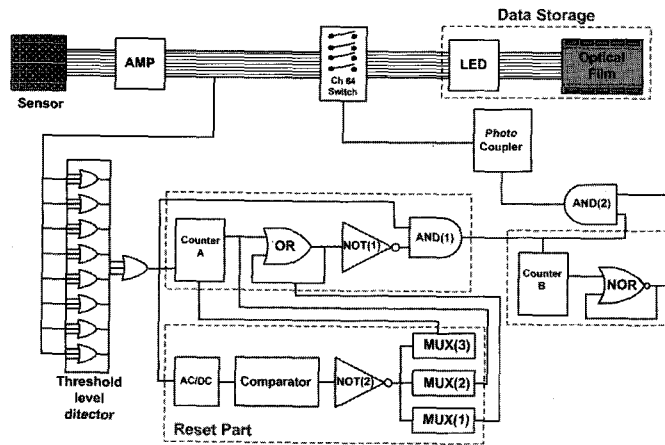


Fig. 6 AE signal analyzer

된 구조로 되어 있으므로, OR-gate로 ON신호가 한번 입력된 이후에는 Mux를 통하여 리셋되기 전까지는 항상 ON신호를 출력하게 되어 있다. OR-gate에서 ON신호가 출력되면 NOT(1)소자를 통해 항상 OFF상태가 되기 때문에 두개의 AND-gate를 통과한 신호는 항상 OFF가 되어 스위치가 열려있는 상태가 유지된다. 따라서 64 채널의 증폭기에서 증폭된 AE신호가 발광다이오드로 전달되지 않아 일정 횟수의 AE신호만 선택적으로 출력할 수 있게 된다.

AE신호는 Fig. 7과 같이 복합재료의 균열이 발생하는 과정에서 반복적으로 발생될 수 있으므로, 이를 누적하여 저장하여야 한다. 이를 위하여 Fig. 6에 보는 바와 같은 Reset Part를 설계하였다. Reset Part에서는 Threshold Level Detector에서 출력된 디지털 신호를 AC/DC 변환기를 이용하여 RMS값으로 변환한다. 변환된 RMS값이 일정값 이하이면 Mux를 통해 Counter A와 OR-gate에 OFF신호를 보내 초기화한다. 초기화된 Counter A와 OR-gate는 새로운 AE신호를 카운트하도록 되어 있다. 이때 Counter B는 Mux와 연결되어 있지 않으므로 초기화되지 않으며, AE신호의 전체 횟수를 카운트하도록 되어 있다. Fig. 7은 발생된 AE신호에 대해서 Counter A의 출력단을 21으로 하여 신호 횟수를 2개로 제한하였을 때, Counter A, B의 출력을 나타낸 그림으로, Counter B는 연속적으로 신호의 횟수를 카운트할 수 있다. 전체 AE신호가 일정횟수 이상이면 발광다이오드 출력을 제한하여 전체 측정시스템을 중지시키도록 하기 위하여 Counter B의 뒷단에 NOR-gate를 설치하였다. Fig.

8은 구성된 전체 회로의 time chart로서, Counter A의 출력단을 2^0 로, Counter B의 출력단을 2^1 로 고정하였을 경우, 스위치가 총 2번 ON되어 발광다이오드를 작동시키도록 구성되어져 있다. 그림에서 AC/DC 변환기는 앞에서도 설명한 바와 같이, 디지털 출력을 RMS값으로 변환시키는 회로로서 Fig. 9와 같이 구성하였다[8]. Fig. 9의 AC/DC 변환기는 디지털 출력에 대하여 일정시간이 경과한 후에 직류값으로 환산되므로, 구성된 회로에 대한 특성을 평가할 필요가 있다. Fig. 10은 AC/DC 변환기의 특성을 평가하기 위한 회로도로서, 함수발생기로부터 출력되는 신호를 일정 개수만 AC/DC 변환기로 보낼 수 있도록 구성되어져 있다. Fig. 10의 회로를 이용하여 230 kHz의 신호를 1개만 보냈을 경우 RMS출력값은 1.2V로 측정되었고, 2개를 보냈을 경우 RMS출력은 3.2V로 측정되었다. 본 논문에서는 Fig. 8에서와 같이 RMS출력이 0.3V이하가 되면 AE신호군이 일시적으로 소멸된다고 가정하고 Mux를 통해 Counter A와 OR-gate를 초기화시켰다.

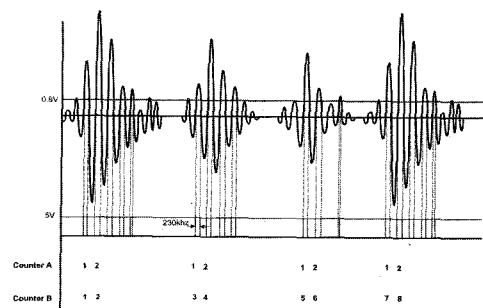


Fig. 7 Typical AE signals

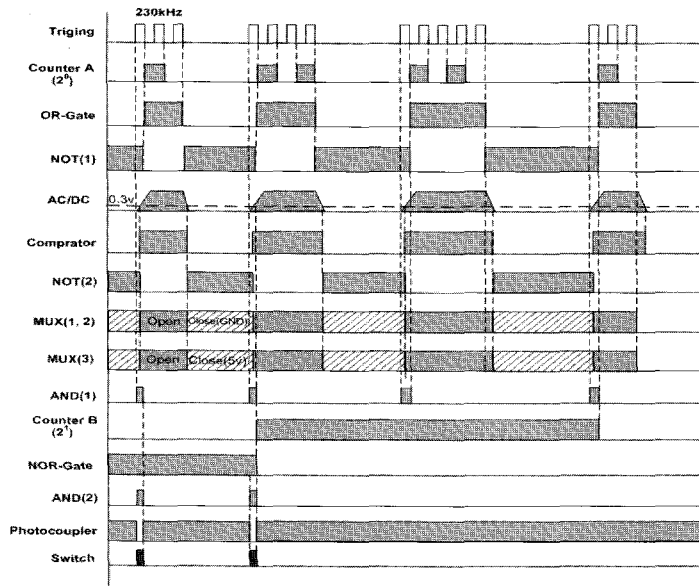


Fig. 8 Time chart of the switch control circuit

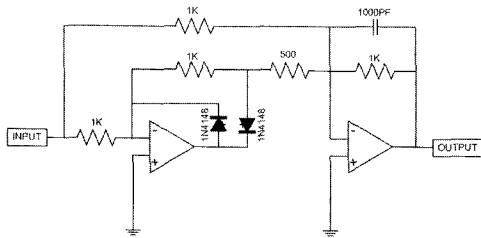


Fig. 9 AC/DC converter

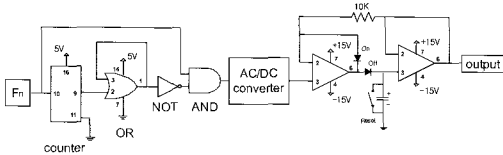


Fig. 10 Circuit for evaluation of the AC/DC converter

3. 인장시험에서의 AE신호 분석

Fig. 3의 인장시험편으로 인장시험을 수행하여 AE신호의 위치와 발생지점을 분석하였다. Fig. 11은 인장시험 후 파손된 시험편의 모습을 나타낸 사진으로, 초기 AE 신호발생 시점에서는 균열의 발생을 육안으로 관찰할 수 없었다.

Fig. 12 (a)는 Counter A의 출력단을 2⁰, Counter B의 출력단을 2⁰로 고정하였을 때의 광출력 사진

이다. Fig. 12 (b)는 Counter A의 출력단을 2⁰, Counter B의 출력단을 2¹으로 고정하였을 때의 광출력 사진으로, 2⁰의 AE신호를 두 번 획득한 결과이다. Fig. 12 (a), (b)에서 보는 바와 같이 V-notch가 있는 위치에서 광출력이 발생하여 AE신호의 발생위치와 일치함을 볼 수 있다. Fig. 12 (c)는 Counter A의 출력단을 2¹, Counter B의 출력단을 2¹으로 고정하였을 때의 광출력 사진이다. Fig. 12 (d)는 Counter A의 출력단을 2¹, Counter B의 출력단을 2²으로 고정하였을 때의 광출력 사진으로, 2¹의 AE신호를 두 번 획득한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 주로 섬유방향과 일치하는 한 줄의 센서들에서 광출력이 검출됨을 볼 수 있다. AE신호의 전파속도는 매질에 따라 변화되며, 탄소섬유의 전파속도 C_p 는 약 5 km/s, 기지재의 C_p 는 약 2 km/s로 알려져 있다[9]. Counter A에서 21개의 신호를 카운트하기 위하여 소요된 시간은 230 kHz의 한 파형이 통과된 시간보다 약간 크다고 볼 수 있으므로 약 4.4 μsec이다. 따라서 탄소섬유의 전파속도를 곱해보면 AE신호가 움직인 거리는 약 22 mm가 되어 센서길이와 거의 일치하므로 Fig. 12 (c), (d)의 결과와 일치함을 볼 수 있다. Fig. 12 (e)는 Counter A의 출력단을 2², Counter B의 출력단을 2²으로 고정하였을 때의 광출력 사진이다. Fig. 12(f)는 Counter A의 출력단을 2², Counter B의 출력단을 2³으로 고정하였을 때의 광

출력 사진으로, 2²의 AE신호를 두 번 획득한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 섬유방향과 일치하는 라인에 배열된 센서들 뿐 만 아니라, 섬유방향에 수직인 방향으로도 다수의 광 신호가 검출되었음을 볼 수 있었다.

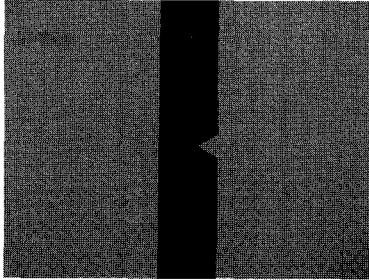
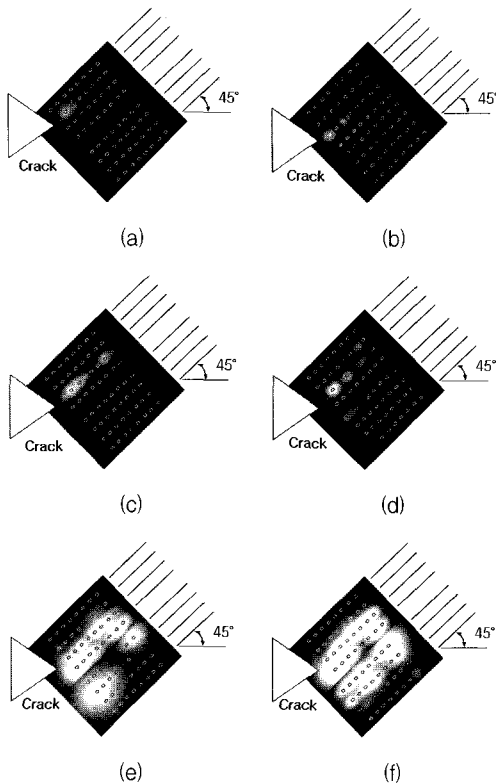


Fig. 11 Photograph of the fractured tensile specimen



- (a) Counter A : 2⁰, Counter B : 2⁰
 (b) Counter A : 2⁰, Counter B : 2¹
 (c) Counter A : 2¹, Counter B : 2¹
 (d) Counter A : 2¹, Counter B : 2²
 (e) Counter A : 2², Counter B : 2²
 (f) Counter A : 2², Counter B : 2³

Fig. 12 Photograph of the optical output

4. 결론

본 연구에서는 매트릭스(Matrix)형 피에조 센서를 이용하여 AE신호특성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 8X8 매트릭스형 AE센서를 설계, 제작하였으며, 센서에서 나온 다채널 신호를 증폭하고 일정시간 간격으로 획득할 수 있는 전용 분석회로를 설계, 제작하였다.
- 2) 제작된 전용분석회로를 이용하여 64 채널 AE신호를 광학기법으로 저장하였으며, 복합재료의 단순 인장시험에서 발생되는 AE신호의 발생위치와 진행방향을 효과적으로 검출할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 (KRF-2005-005-J09902)과 2단계 BK21 사업의 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] J. J. Reinhart (Eds), Composite, ASM International, Vol. 1, pp. 479-495, (1987)
- [2] J. E. Masters (Eds). Damage Detection in Composite Materials. ASTM STP 1128, pp. 3-84 (1992)
- [3] J. Y. Chen, V. Hoa, C. K. Jen and H. W. Wang, "Fiber-optic and ultrasonic measurements for in-situ cure monitoring of graphite/epoxy composites," Journal of Composite Materials, Vol. 33, No. 20, pp. 1860-1881 (1999)
- [4] O. Y. Kwon and Y. A. Dzenis, "Real-time detection of damage in composite structures by using PVDF sensor," Proceedings of the Korean Society for Composite Materials Autumn Annual Meeting, pp. 118 (2002)
- [5] J. K. Lee, J. H. Lee and H. K. Yoon, "Evaluation of AE characteristics on microscopic fracture mechanism of Al

- 7075/CFRP hybrid composite," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 5, pp. 1-6 (2002)
- [6] N. S. Choi and K. Takahashi, "Characterization of the damage process in short fiber/thermoplastic composites by acoustic emission," *Journal of Materials Science*, Vol. 33, No. 9, pp. 2357-2363 (1998)
- [7] Y. H. Yu, J. H. Choi, J. H. Kweon and D. H. Kim, "A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission composite structures," *Journal of Composite Structures*, Vol. 75, pp. 163-169 (2006)
- [8] R. F. Coughlin and F. F. Driscoll, *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits*, Prentice Hall, Chap. 7 (1991)
- [9] T. Kundu, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, CRC Press, Chap. 1 (2004)