

## 초음파와 음향 방출법을 이용한 복합재료 직교적층판의 점진적 손상과정에 관한 연구

전 흥 재\* · I. M. Daniel\*\*  
(1998년 5월 21일 접수)

### Responses of Ultrasonic Backscattered Energy and AE Characteristics on the Progressive Damage of Crossply Composite Laminates

Heoung-Jae Chun and Isaac M. Daniel

**Key Words:** Crossply Composite Laminate(복합재료 직교적층판), Progressive Damage(점진적 손상), Ultrasonic Backscattered Energy(초음파 후방산란 에너지), Acoustic Emission(음향 방출법).

#### Abstract

Responses of ultrasonic back scattered energy and AE (Acoustic Emission) characteristics related to the progressive damage of  $[0/90_2]_s$  and  $[0/90_4]_s$  crossply laminates were studied. It was found that the ultrasonic backscattered energy was sensitive to the matrix cracking but not sensitive to other failure mechanisms. However, AE was proved to be sensitive to matrix cracking as well as other failure mechanisms. AE signals were analyzed by investigating the amplitude and number of counts per event for corresponding applied strain. Loading and unloading tests were conducted separately. AE results showed Kaiser effect in the crossply composite laminates and ultrasonic results supported the AE results.

#### 1. 서론

최근에 들어 산업 분야가 다양해지고 경량화를 요구함에 따라 비강성, 비강도, 내부식성 등의 우수한 재료특성 뿐만 아니라 보강섬유의 방향을 임의로 변환시켜 얻을 수 있는 가변적 이방성 특

징으로 인하여 복합재료는 우주·항공, 방위산업, 자동차, 스포츠 등의 여러 분야에 기존의 재료를 대체하여 많이 쓰여지고 있다.

복합재료 직교적층판은 단일층(Lamina)들이 서로 직교하도록 적층된 형태로서 일반적인 복합재료 구조물에 많이 쓰인다. 하지만 이러한 구조물의 신뢰적 사용을 위해서는 직교적층판의 강도, 강성 및 수명 감소를 일으키는 손상 및 파괴 메커니즘(Mechanism)에 대한 이해와 손상정도를 감지할 수 있는 평가방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 그 이유는 직교적층판의 손상은 모재의 균열, 층간분리, 모재와 보강섬유의 분리, 보강섬

\* 회원, 연세대학교 기계전자공학부

E-mail: hjchun@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-4827 FAX : (02)362-2736

\*\* Departments of Mechanical and Civil Engineering,  
Northwestern University

유의 파단 등이 순차적 또는 동시 다발적으로 발생하는 복잡한 현상을 보여주기 때문이다. 복합재료 적층판에 관한 점진적 파손에 관한 연구는 과거로부터 활발히 이루어져 왔다. 복합재료 직교적층판에 정적 또는 동적 하중이 가해지면, 횡방향(Transverse)층의 모재에 균열이 발생하고 하중이 증가하면 추가적인 균열의 발생을 가져오며, 횡방향층 균열 밀도가 특정한 한계 값에 도달한 다음에야 종방향(Longitudinal)층 균열 및 횡방향층과 종방향층 간의 접합부분의 박리현상 등이 나타난다는 것이 밝혀졌다.<sup>(1,2)</sup> 이때 복합재료 직교적층판에 가해진 하중이 증가하면서 발생하는 횡방향층 모재의 균열밀도는 복합재료 직교적층판의 강성을 감소시킨다는 사실이 몇 연구가들에 의해 밝혀졌고,<sup>(3~5)</sup> 이러한 강성의 감소로부터 복합재료의 손상정도를 예측하는 모델을 제시하려는 시도도 이루어져왔었다.<sup>(6,7)</sup>

앞에서 열거한 연구 내용들을 종합해보면 직교적층판의 횡방향 모재에 발생하는 균열 밀도는 직교적층판의 손상과 가장 큰 연관이 있음을 알 수 있고, 그 발생된 균열을 감지하고 그 균열 밀도를 쉽게 측정할 수 있다면 복합재료 직교적층판의 잔류수명이나 잔류강도를 예측하는데 많은 기여를 할 수 있을 뿐만 아니라 복합재료 직교적층판의 신뢰적인 사용에 도움이 될 것으로 판단된다.

복합재료 직교적층판의 횡방향층 모재에 발생한 균열을 감지할 수 있는 방법으로는 X선 투과법, 전사방법(Replication Method) 등이 있는데, 이러한 방법들은 재료에서 발생하는 파손과정을 실시간으로 관측할 수 없다는 단점을 가지고 있다.<sup>(8)</sup> 따라서 본 논문에서는 횡방향층 모재에 발생한 균열을 실시간으로 측정하기 위해 초음파 후방산란 에너지(Backscattered Energy)를 이용한 방법을 제시하고 복합재료 직교적층판에 점진적 손상과정에 대한 이해와 초음파 후방산란 에너지(Backscattered Energy)가 다양한 파괴 메커니즘에 어떻게 반응하는지 관측하기 위해 음향방출법(Acoustic Emission)에 의한 실험도 동시에 병행하였다. 음향방출법은 대상물에 붙인 음향방출 센서(Sensor)로부터 다양한 미시적 파괴에 따른 탄성과 방출을 감지하여 손상의 위치, 크기, 종류를

추정할 수 있는 실험적 검사법이다. 복합재료에 대한 음향방출법에 관한 연구는 국내외적으로 많이 이루어져왔다.<sup>(9-15)</sup> 특히 전홍재와 Daniel<sup>(16)</sup>은 복합재료 직교적층판의 점진적 손상 과정과 직교적층판에서 횡방향층의 체적비 변화에 따른 음향방출법에 관한 연구를 수행한 바 있다.

## 2. 실험

본 연구에 사용된 복합재료는 Hercules사의 IM7/8551-A Graphite/Epoxy이고  $[0/90_2]_s$  와  $[0/90_4]_s$  의 두 종류의 직교적층판에 대해 실험이 수행되었다. 복합재료를 프리프레그(prepreg) 상태로 구입한 후에 고온 프레스(Hot Press)와 실험실에서 자체 제작된 미니 크레이브를 이용해 크기가 30 cm x 30 cm인 두 종류의 직교적층판을 제작하였다. 길이 3.8 cm와 폭 30 cm의 크기를 갖는 Glass/Epoxy 탭(Tab)을 추가로 제작하여 American Cynamid사의 FM73 접착제를 사용하여 고온 프레스에서 탭을 직교적층판의 양 끝단 양면에 접착시켰다. 탭이 접착된 직교적층판은 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 길이 30 cm 폭 2.5 cm 인 시편으로 가공하였다.

제작된 시편은 컴퓨터에 의해 작동되는 유압 만능 인장 시험기에 장착한 후에 인장하중을 가해주면서 로드셀(Load Cell)과 신장계(Extensometer)를 통해 응력과 변형률 곡선을 얻었고 시편에는 초음파 트랜스듀서와 음향방출 센서를 동시에 부착시켜 하중 증가에 따른 손상에 의한 초음파 후방산란 에너지와 음향방출 신호를 실시간으로 얻은 후에 개인용 컴퓨터에 저장하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치를 도식적으로 보여주고 있다.

본 실험에서는 10 MHz의 공진 주파수를 가진 초음파 트랜스듀서가 사용되었다. 펄서(Pulser)로부터 나온 전기적 신호는 초음파 트랜스듀서를 가동시켜 초음파를 발생시키며, 발생된 초음파는 경사각이 60° 인 앵글웨지(Angle Wedge)를 통해 복합재료 시편에 경사지게 입사된다. 입사된 초음파 중에 횡방향층 모재의 균열에 의해 산란된

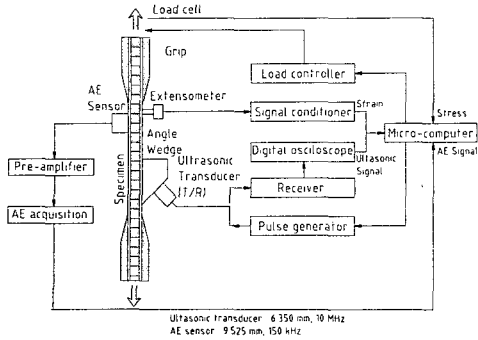


Fig. 1 Schematic diagram of system used for AE and ultrasonic monitoring of damage in composite materials

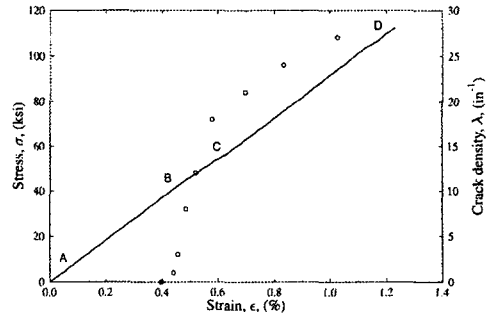
초음파 파형은 동일한 트랜스듀서를 통해 감지된 다음에 리시버(Receiver)를 통해 증폭된 후에 디지털 오실로스코프(Digital Oscilloscope)에서 디지털 신호로 바뀌어 개인용 컴퓨터에 저장된다. 실험이 끝난 후에 저장된 파형으로부터 초음파 후방산란 에너지를 얻을 수 있다.

직교적층판의 손상 및 파괴에 따른 음향방출 특성을 고찰하기 위해서 공진주파수가 150 kHz인 음향방출 센서가 사용되었고 음향방출 센서로부터 탐지된 탄성과 신호는 프리앰프(Pre-Amp)에서 일차적 증폭을 얻은 후에 PAC사의 Locan-AT를 통해 2차 증폭되어 음향방출 신호의 특성 변수들을 추출한 후에 하드 디스크(Hard Disk)에 저장되었다.

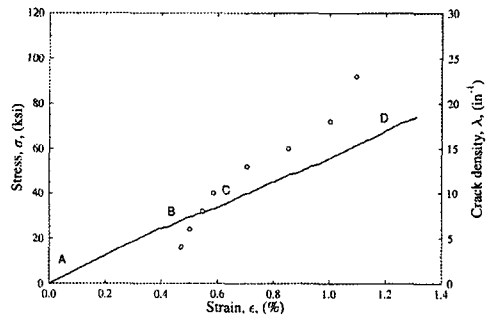
복합재료 직교적층판의 점진적 손상에 가장 큰 영향을 미치는 횡방향층 모재의 균열 밀도는 전사 방법을 이용하여 얻을 수 있었다. 이 방법은 균열이 생긴 횡방향층에 아세톤(Aceton)을 바르고 Ernest Fullman사의 전사 필름을 접착시켰다가 분리하면 필름에 균열이 복제되는 원리를 이용한 것으로 숙련된 기술이 요구된다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 인장시험과 전사법을 통해 얻은  $[0/90_2]_s$ 와  $[0/90_4]_s$  직교적층판의 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)과 횡방향층의



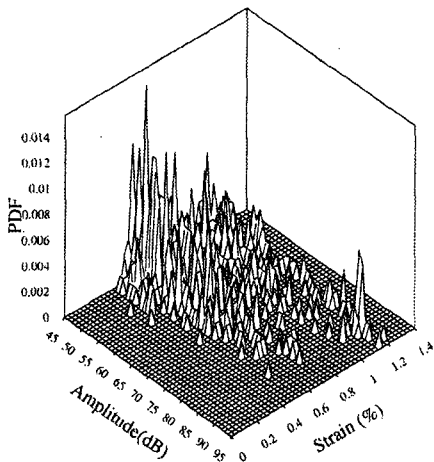
(a)  $[0/90_2]_s$



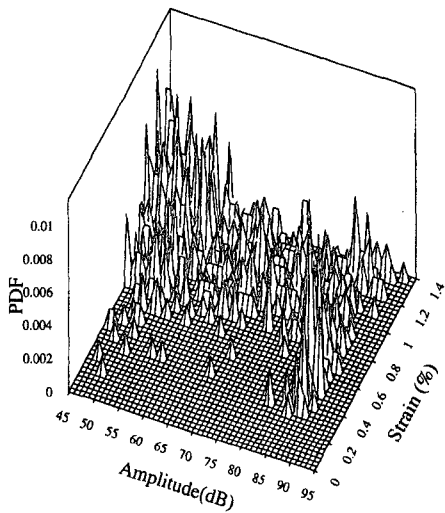
(b)  $[0/90_4]_s$

Fig. 2 Stress-strain curve and transverse crack density as a function of applied strain for IM7/8551-7A graphite laminates

모재에 발생한 균열밀도(Crack Density)의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2에 나타난 AB구간은 응력과 변형률이 선형적인 관계에 있고, 전사법을 통하여 이 구간에는 재료에 손상이 전혀 발생하지 않았음을 알 수 있었다. BC구간은 횡방향층의 모재에 균열이 직교적층판의 손상을 주도하는 구간으로, B점은 횡방향층의 모재에 균열이 처음 발생한 시점을 나타내며, B점 이후로는 횡방향층의 모재에 균열밀도의 점진적인 증가로 인하여 응력-변형률 관계가 선형적인 관계로부터 벗어나고 있음을 알 수 있다. 횡방향층 모재의 균열밀도의 증가는 C점까지 지속됨을 보이지만 C점 이후로는 증가율이 감소하는 경향을 보여주고 있다. CD구간에서는 횡방향층의 모재의 균열보다는 종방향층과 횡방향층의 미세박리현상, 종방향층 모재의 균열 생성 그리고 보강섬유의 파단 등



(a) [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>



(b) [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>

**Fig. 3** Distribution of AE events as a function of amplitude and applied strain for IM7/8551-7A [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> and [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub> graphite/epoxy laminates

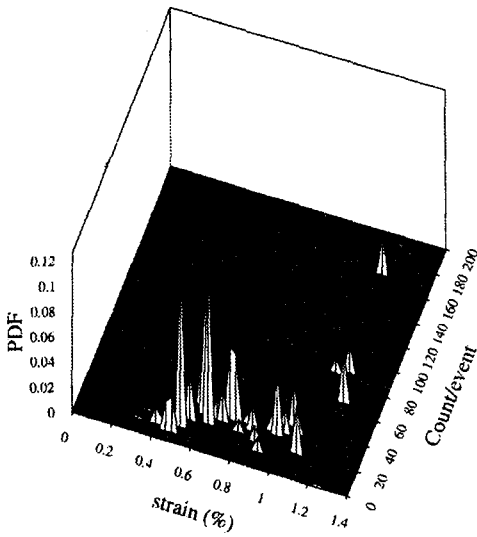
이 복합적으로 일어나며, D점은 재료가 파괴된 지점을 나타낸다.

복합재료 직교적층판의 손상과정과 후방산란 에너지의 변화량을 좀 더 명확하게 이해하기 위하여 음향방출 센서를 초음파 트랜스듀서와 함께 시편에 부착시킨 후에 인장시험을 실시하였고 하중 증가에 따른 다양한 파괴기구에 의해 발생한

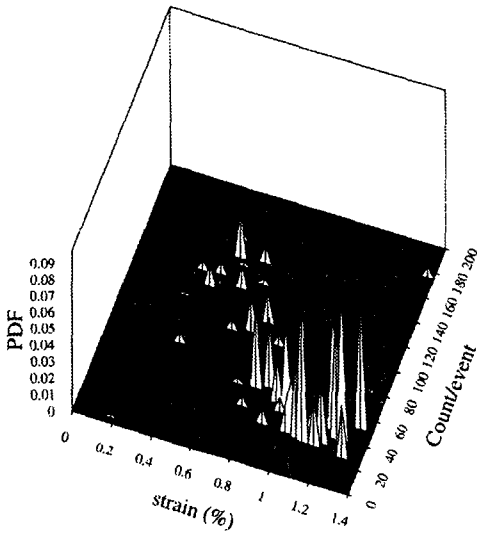
탄성파를 감지해왔다.

Fig. 3는 직교적층판이 파괴될 때까지의 변형을 변화에 따른 탄성파 진폭의 PDF(Probability Density Function)를 보여주고 있다. Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 복합재료 직교적층판에 손상이 발생하기 전의 변형을 구간에서는 음향방출 센서에 어떤 신호도 수신되지 않고 있으며, 이는 초음파 트랜스듀서에서 발생한 파가 음향방출 센서에 아무런 영향을 미치지 않고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 그 이유는 실험에 사용되었던 초음파 트랜스듀서와 음향방출 센서의 공진 주파수 대가 상당히 차이가 나기 때문인 것으로 생각된다. 또한, Fig. 3으로부터 횡방향층의 균열이 발생하는 구간에서는 [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> 직교적층판인 경우는 85 dB 이하인 상대적으로 낮은 진폭의 탄성파 신호를 감지되었으나 [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub> 직교적층판에서는 85 dB 이상의 높은 진폭의 탄성파 신호가 감지되었는데 그 이유는 [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub> 직교적층판이 [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> 직교적층판보다 횡방향층의 체적이 2 배정도 크기 때문으로 추정할 수 있다. 재료가 파단에 이르는 높은 변형을 구간에서는 높은 진폭의 탄성파가 감지되었는데 이 변형을 구간에서는 보강섬유의 파단이 일어나는 상태임을 감안 할 때에 이 신호들은 보강섬유의 파단으로부터 나왔음을 알 수 있다. 두 종류의 직교적층판의 경우는 모두 균열에 의한 마찰이나 종방향층 모재의 균열, 층간 분리 등의 파손이 일어나는 구간에서는 주로 85 dB 이하의 중간 크기의 진폭을 가지는 탄성파가 주로 감지되었음을 알 수 있다.

Fig. 4는 이벤트(Event)당 발생한 카운트(Count)의 수 인 NCE(Number of Counts per Event)와 변형률의 변화에 따른 3차원적 PDF를 보여주고 있다. 횡방향층의 균열이 발생하는 변형을 구간에서는 [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> 경우에는 낮은 NCE를 가지는 신호가 감지된 반면에 [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub> 인 경우는 높은 NCE 신호가 많이 발생함을 알 수 있다. 하지만 [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>와 [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>의 두 가지 경우에



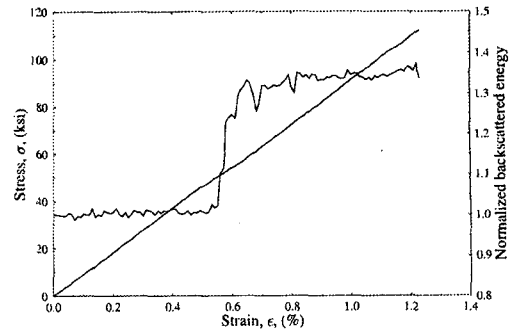
(a) [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>



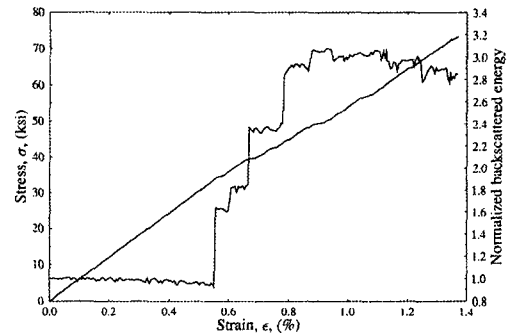
(b) [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>

**Fig. 4** Distribution of AE events as a function of NCE(Number of Counts per Event) and applied strain for IM7/8551-7A [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> and [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub> graphite/epoxy laminates

에 대해 복합재료가 파괴되기 직전의 높은 변형을 구간에서는 보강섬유의 파단이 일어나고 이때 발생하는 탄성파는 160 이상의 높은 NCE를 갖는



(a) [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>



(b) [0/90<sub>4</sub>]<sub>s</sub>

**Fig. 5** Stress-strain curve and ultrasonic backscattered energy as a function of applied strain for IM7/8551-7A graphite/epoxy laminates

신호가 감지되었다. 직교적층판의 균열에 의한 마찰, 종방향층의 모재균열, 층간분리에서 발생하는 탄성파 신호들은 20에서 70 정도의 크기의 NCE를 갖는 낮은 주파수의 신호를 방출한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 인장하중 시험 결과와 그에 따른 횡방향층의 균열 발생으로 인한 초음파 후방산란 에너지의 변화를 보여주고 있다.

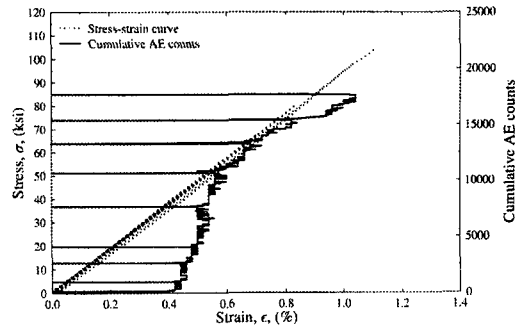
이 방법은 웨지 (Wedge)를 이용하여 트랜스듀서(Transducer)로부터 발생된 초음파를 직교적층판에 경사지게 입사시키고, 이때 횡방향층의 모재에 균열이 존재한다면 균열이 존재하는 종방향층과 횡방향층의 접면에서는 균열에 의해 초음파가 산란되고 그 산란된 일부가 반사되고 그 후방산란 에너지의 양은 재료의 균열 밀도에 비례한

다는 원리를 이용한 것이다. 그림에서 보이듯이 시편에 아무런 손상도 생기지 않았을 경우에는 일정량의 후방산란 에너지가 감지되지만 횡방향층 모재에 균열이 생기면 후방산란 에너지는 급격한 증가를 보여주게 되고 그 증가량은 횡방향층 모재의 균열밀도에 비례함을 알 수 있다. 하지만 횡방향층 모재에 발생한 첫 번째 균열이 트랜스듀서가 감지할 수 있는 부위에서 떨어진 곳에서 발생하였다면 아무런 변화도 감지하지 못하는 단점이 있다.

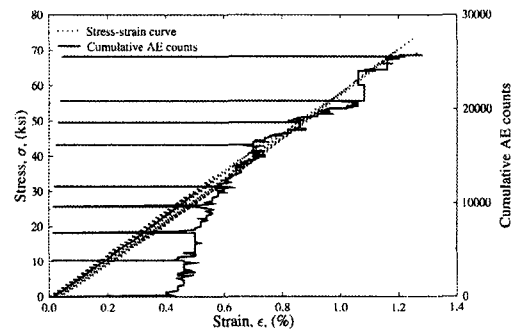
실험 결과로부터 시편에 아무런 손상이 생기지 않더라도 약간의 후방산란 에너지가 존재함을 알 수 있었는데 그 이유는 복합재료 표면의 거칠기와 복합재료의 이방성 특성 그리고 트랜스듀서의 접합상태에 기인한 것으로 추정될 수 있다. 트랜스듀서와 시편간의 접합조건이 일정하다면 초기량은 일정하게 유지될 것이다. 초음파 후방산란 에너지는 횡방향층 모재의 균열발생률이 높은 변형률 구간에서는 급격한 증가율을 보이지만 균열발생이 안정되는 변형률 구간에서는 후방산란 에너지의 증가율도 현격한 감소를 보여주고 복합재료가 파단되려는 직전의 높은 변형률 구간에서는 오히려 감소하는 경향을 보여주고 있다.

이 높은 변형률 구간에서는 횡방향층 모재의 균열이 아니라 다른 파괴 메커니즘에 의해 손상이 지배되기 때문에 더 이상의 횡방향층 모재의 균열에 의한 후방산란 에너지의 증가는 없으나 종방향층 모재의 균열, 종방향과 횡방향층의 미세 박리 그리고 섬유보강재의 파단 등에 의해 횡방향층 모재의 균열로부터 후방산란된 초음파의 일부가 다른 방향으로 다시 산란되어 트랜스듀서에 감지되는 양이 상대적으로 감소함으로 생기는 현상이다. 이 결과로부터 후방산란 에너지는 횡방향층 모재의 균열에는 민감하게 반응하나 그 밖의 다른 손상 및 파괴 메커니즘에는 둔감한 반응을 보임을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 두

$[0/90_2]_s$ 와  $[0/90_4]_s$  직교적층판의 경우에 유사하게 나타났다. 하중조건에 따른 손상에 대한 이해와 그에 따른 후방산란 에너지의 변화와 음향방출신호의 변화를 살펴보기 위해 하중-제하중 시험을 수행하였다.



(a)  $[0/90_2]_s$



(b)  $[0/90_4]_s$

Fig. 6 Stress and cumulative AE events versus strain for loading and unloading of IM7/8551-7A graphite/epoxy crossply laminates

Fig. 6은 직교적층판에 하중-제하중을 실시한 결과 변형률 변화에 따른 음향 방출 신호의 누적 카운트(Cumulative Count)의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6에서 누적 카운트가 구성하는 포락선(Envelope)의 기울기는 탄성파의 방출증가율을 보여준다. 횡방향층의 모재에 균열이 일어나는 변형률 구간에서 높은 음향방출 카운트의 증가율을 보여줌을 알 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 제하중 시 아무런 음향방출 활동이 감지되지 않았고 전 단계에 가해진 최대응력 이상 응력이 가해진 경우에만 추가적으로 재료 파손에 의한 탄성파가 감지되었다. 제하중시 전 단계 최대응력에 근접한 곳에서 발생한 음향방출 신호는 주로 균열의 마찰에 의한 것으로 추정된다. 따라서 본 재료의 직교적층판에는 카이저 효과가 존재함을 확인할 수 있었다.

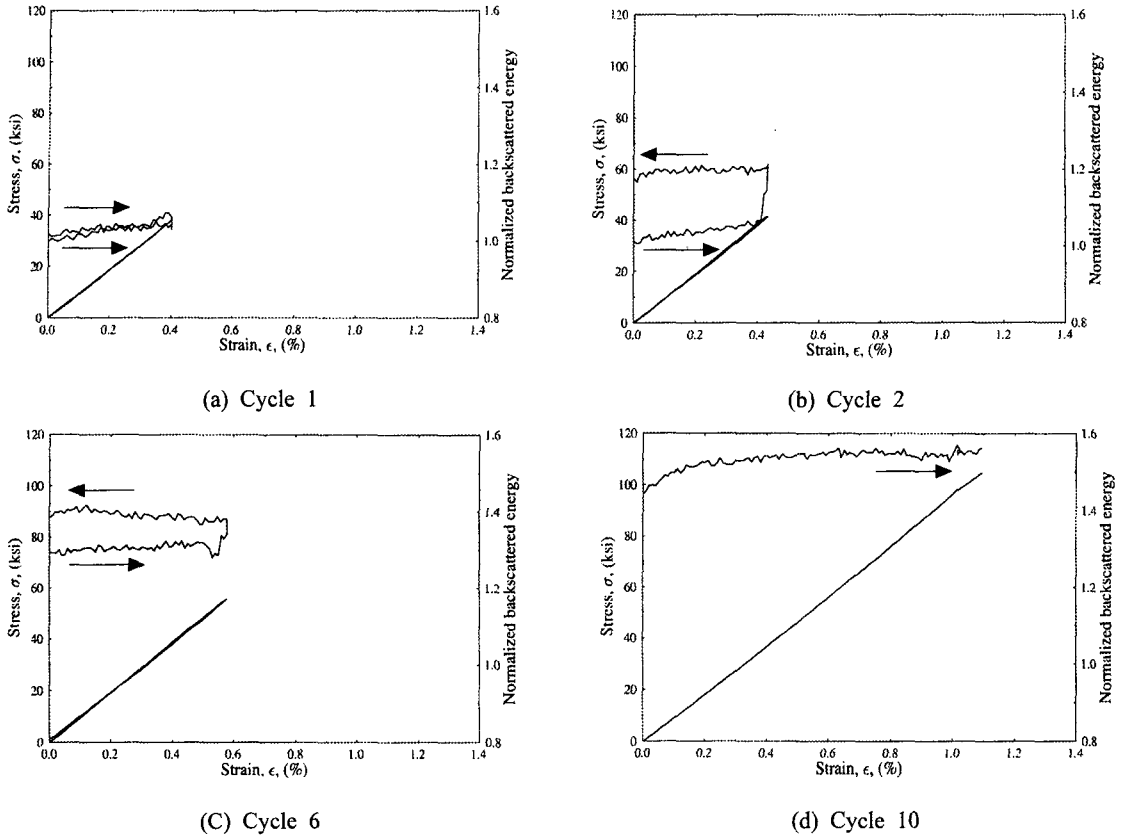


Fig. 7 Stress and ultrasonic backscattered energy versus strain for loading and unloading of  $[0/90_2]_s$  IM7/8551-7A graphite/epoxy laminates

Fig. 7과 Fig. 8은  $[0/90_2]_s$ 와  $[0/90_4]_s$  시편에 대해 최대 하중을 점진적으로 증대시키면서 하중-제하중 실험을 수행하였을 때의 각각의 하중-제하중 사이클에서의 변형률 변화에 따른 후방산란 에너지의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 7의 (a)는 하중-제하중의 첫 번째 사이클에서 후방산란 에너지의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 횡방향층의 균열이 발생하지 않은 경우는 하중-제하중에 따른 후방산란 에너지의 변화가 없음을 보여줌과 동시에 하중의 변화에 따른 트랜스듀서의 접촉조건에도 아무런 변화가 없음을 간접적으로 보여주고 있다.

하지만 Fig. 7의 (b)와 (c)에서 알 수 있듯이 하중이 증가하면서 횡방향층 모재의 균열이 생성되면 후방산란 에너지의 급격한 증가를 가져온다.

제하중 시에는 후방산란 에너지의 변화가 없음을 알 수 있고 이것은 음향방출을 통해 관찰된 카이저 효과를 뒷받침 해주고 있다. Fig. 7의 (d)에서는 더 이상의 후방산란 에너지의 증가는 없고 오히려 약간의 감소를 보이는데 이것은 복합재료가 파괴되기 전의 높은 변형률 구간에서 횡방향층의 모재의 균열보다는 종방향층과 횡방향층의 미세 박리현상, 종방향층 모재의 균열 생성 그리고 보강섬유의 파단등이 복합적으로 일어나고 있음을 간접적으로 확인해 주는 것이다.

Fig. 8에서도 이와 같은 경향을 볼 수 있다. 이로서 하중-제하중 조건에서는 추가적인 재료의 파손은 일어나지 않음을 알 수 있었고 이와 같은 사실은 하중-제하중에 의한 응력-변형률 곡선이 단순 하중에 의한 응력-변형률 곡선을 따라간다는 사실로부터 재확인 할 수 있었다.

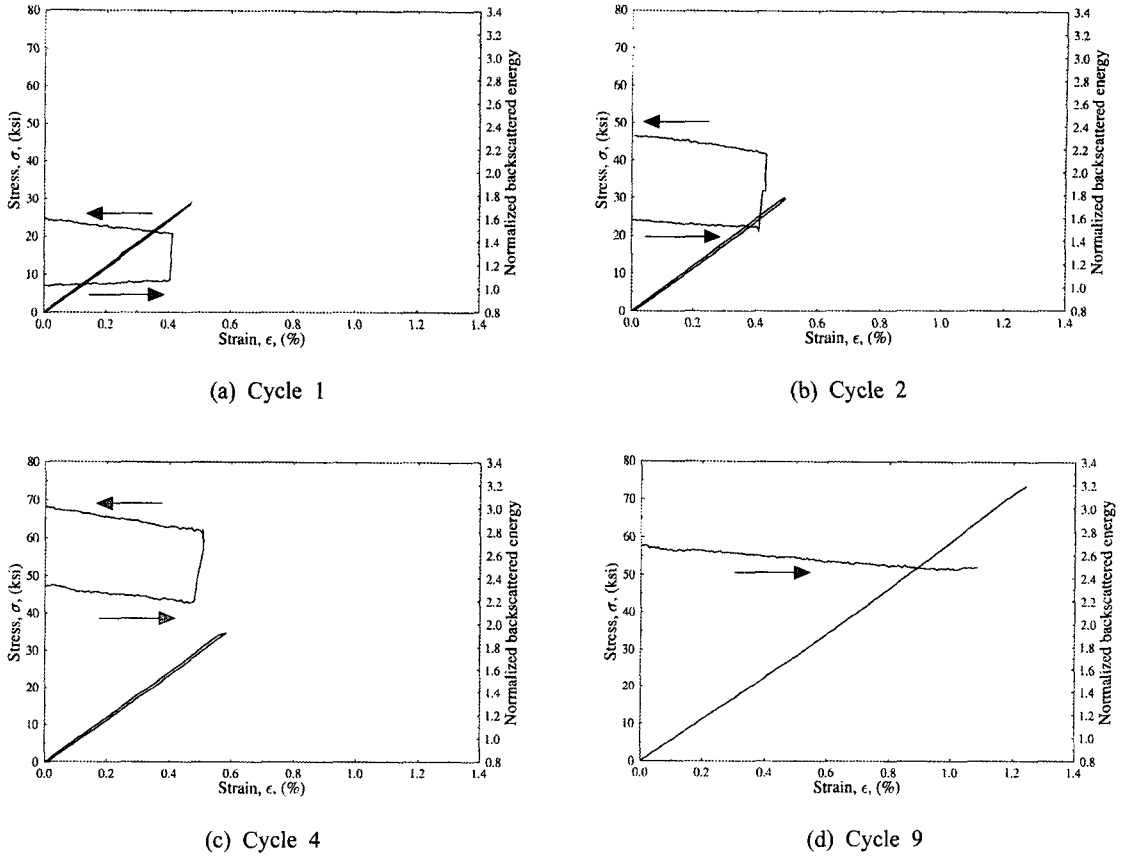


Fig. 8 Stress and ultrasonic backscattered energy versus strain for loading and unloading of  $[0/90_4]_s$  IM7/8551-7A graphite/epoxy laminates

#### 4. 결론

본 연구에서는  $[0/90_2]_s$ 와  $[0/90_4]_s$  복합재료 직교적층판의 하중증가에 따른 점진적 손상과정과 그 정도를 음향 방출과 초음파를 이용하여 실험적으로 고찰하여 보았다.

복합재료 직교적층판의 손상과정에 따른 음향 방출 특성을 살펴보기 위해 음향방출 센서를 부착하여 실험을 수행한 결과 감지된 음향방출 신호의 진폭과 이벤트 당 발생한 카운트의 수 인 NCE가 횡방향층 모재의 균열, 종방향과 횡방향층의 미세박리, 종방향층 모재의 균열과 보강섬유의 파단 등의 손상 메커니즘을 변별하는데 유익하게 쓰일수 있는 변수라는 결론을 얻었다.

또한 직교적층판의 손상에 따른 초음파 후방

산란 에너지의 변화를 살펴보면 직교적층판에 손상이 발생하기 전까지는 복합재료의 표면 거칠기와 이방성 특성 그리고 트랜스듀서의 접합조건에 따른 일정한 소량의 후방산란 에너지가 감지되었지만 횡방향층 모재에 균열이 발생하기 시작하자 급격한 후방산란 에너지의 증가를 가져왔다. 후방산란 에너지의 증가는 횡방향층 모재의 균열밀도 증가에 비례함을 알 수 있었고 이를 이용하여 직교적층판의 손상 정도를 비파괴적으로 측정하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 후방산란 에너지는 횡방향층 모재의 균열에는 민감하게 반응하나 종방향과 횡방향층의 미세 박리 그리고 섬유보강재의 파단 등의 다른 손상 메커니즘에는 둔감한 반응을 보였다.

하중-제하중 과정에서의 음향방출 신호를 분석하고 후방산란 에너지의 변화를 살펴봄으로써 복



합재료 직교적층판의 손상 및 파괴 메커니즘에 대한 이해를 증진시켰고 후방산란 에너지를 이용한 손상평가방법에 대한 신뢰성을 재확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) Charewicz, A. and Daniel, I. M., 1986, "Damage Mechanisms and Accumulation in Graphite/Epoxy Laminates," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP 907, ed. H. T. Hahn, ASTM, Philadelphia, pp. 274~297.
- (2) Laws, N. and Dvorack, G. J., 1988, "Progressive Transverse Cacking in Composite Laminates," *J. Comp. Mater.* Vol. 22, pp. 900~916.
- (3) Yang, J. N., Jones, D. L., Yang, S. H., and Meskin, A., 1990, "A Stiffness Degradation Model for Graphite/Epoxy Laminates," *J. Comp. Mater.*, Vol. 24, pp. 753~769.
- (4) Talreja, R., 1985, "Transverse Cracking and Siffness Reduction in Composite Laminates," *J. Comp. Mater.*, Vol 19, pp. 335~375.
- (5) Ogin, S. L., Smith, P. A., and Beaumont, P. W. R., 1985, "Matrix Cracking and Stiffness Reduction During the Fatigue of  $[0/90_2]_s$  GFRP Laminate," *Composite Science and Technology*, Vol. 22, pp. 22~31.
- (6) Daniel, I. M., and Lee, J. W., 1990, "Damage Development in Composite Laminates Under Monotonic Loading," *J. Compos. Technol. Res.*, Vol. 12, pp. 98~102.
- (7) Tsai, C.-L., and Daniel, I. M., 1993, "The Behavior of Cracked Cross-Ply Composite Laminates Under General In-Plane Loading," *Damage in Composite Materials*, ed. G. Z. Voyiadjis, Elsevier, pp. 51~66.
- (8) Daniel, I. M., Wooh, S. C. and Lee, J. W., 1990, "Nondestructive Evaluation of Damage Development in Composite Materials," *Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, eds. S. K. Datta, J. D. Achenbach and Y. S. Elsevier, pp. 183~189.
- (9) Bhat, T. M. Hutchins, D. A. and Mottram, J. T., 1993, "Simultaneous Acoustic-Emission and Ultrasonic Tomography Imaging in Anisotropic Polymer Composite-Material," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 94, pp. 944~953.
- (10) Bakuckas, J. G., Prosser, W. H. and Johnson, W. S., 1994, "Characterization of Fatigue Damage in Unidirectional GFRP Composites Through GFRP Acoustic-Emission Signal Analysis," *NDT & E International*, Vol. 27, pp. 27~32.
- (11) Luo, J. J., Wooh, S. C. and Daniel, I. M., 1995, "Acoustic-Emission Study of Failure Mechanism in Ceramic-Matrix Composite Under Longitudinal Tensile Loading," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, pp. 1946~1961.
- (12) Barre, S. and Benzeggagh, M. L., "On the Use of Acoustic-Emission to Investigate Damage Mechanisms in Glass-Fiber-Reinforced Polypropylene," *Composites Science and Technology*, Vol. 52, pp. 369~376.
- (13) 윤동진, 권오양, 이재락, 1990, "음향 방출을 이용한 Loading-Unloading 인장시험시 CFRP의 파괴거동해석," 한국복합재료학회지, 제3권 제2호, pp. 22~30.
- (14) 이유태, 김상태, 권재도, 이택순, 岸 輝雄, 志波光晴, 1995, "탄소섬유 강화 복합재료의 반복 하중에 의한 손상과 파괴에서의 AE특성," 한국복합재료학회지, 제8권 제2호, pp. 40~51.
- (15) 김상태, 이유태, 김광수, 1997, "음향방출법을 이용한 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)의 파괴인성평가," 한국복합재료학회지, 제10권 제1호, pp. 23~33.
- (16) 전홍재, I. M. Daniel, 1998, "복합재료 직교적층판의 손상과정에서의 AE특성에 관한 연구," 한국복합재료학회지 제11권 제5호, pp. 14~21.