

광섬유센서 및 Acoustic Emission을 이용한 Single Fiber Composites의 계면전단강도와 미세파괴기구의 비파괴적 평가

박종만[†] · 이상일 · 권오양*

경상대학교 고분자공학과, 항공기부품기술연구소, *인하대학교 기계공학과

(1998년 4월 16일 접수)

Nondestructive Evaluation of Interfacial Shear Strength and Microfailure Mechanism of Single Fiber Composites Using Embedded Fiber-optic Sensor and Acoustic Emission

Joung-Man Park[†], Sang-Il Lee, and Oh-Yang Kwon*

Department of Polymer Science & Engineering,

Regional Research Center for Aircraft Part Technology, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

[†]e-mail : jmpark@nongae.gsnu.ac.kr

(Received April 16, 1998)

요약: 단섬유 복합재료와 Fibre Bragg Grating (FBG)이라 불리는 광섬유센서를 사용한 복합재료모델의 계면전단강도와 미세파괴기구를 조사하였다. FBG 센서는 비록 전통적인 압전센서에 비해 감도가 약하지만 환경적인 잡음에 거의 영향을 받지 않고, 복합재료 내부에 직접 바로 함몰할 수 있다. 계면전단강도는 Weibull 분포의 통계적 처리를 통하여 구하였다. 단섬유 복합재료의 미세파괴기구의 정량적인 평가는 acoustic emission (AE) 측정과 데이터 분석에 의해 구할 수 있었다. FBG 센서는 수지경화시의 미세변화같은 외란에 의한 스트레인을 측정하는데 유용할 것이며, AE는 고체내를 전파하는 탄성파가 갖는 미소변위를 측정하는데 유용할 것임을 보여 주었다.

ABSTRACT: Interfacial shear strength (IFSS) of a model composite was quantitatively evaluated and the microscopic failure mechanism was investigated by employing the single-fiber composites (SFC) (or fragmentation test) and an embedded fibre-optic sensor called Fibre Bragg Grating (FBG). FBG sensor can be directly embedded into composites and hardly affected by environmental noise although it has a poorer sensitivity than the traditional piezoelectric acoustic emission (AE) sensor. The reliability of IFSS data could be improved by statistical treatment using Weibull distribution. Quantitative evaluation of microfailure mechanism of the SFC could partially be accomplished by utilizing AE measurement and data analysis. FBG sensor can be considered to be effective in measuring the micro-strain due to external disturbance such as resin curing, whereas AE can be effective in detecting the micro-deformation by elastic wave propagating through the solid inside.

Keywords: single fiber composites, fiber-optic sensor, Fibre Bragg Grating (FBG) sensor, acoustic emission, fragmentation test.

서 론

광섬유센서 (fibre-optic sensor)를 이용한 복합재료 prepreg의 경화특성 및 파괴거동인 충격분포에 관한 연구들은¹⁻⁴ 국내외에서 다수 이루어지고 있지만 복합재료에서의 미세파괴기구의 규명과 관련하여 정성적 고찰이 아닌 정량적인 연구는 거의 없는 실정이다. 지능형 재료 (smart 혹은 intelligent materials)의 개념을 지닌 복합재료의 개발에 따라 최근 광섬유를 센서로 복합재료내에 삽입하여 복합재료 내부의 상태를 연속적으로 관찰하며 또한 부분적인 failure 현상과 위치를 확인할 수 있게 되었다. 이러한 목적에 알맞은 센서로는 현재까지 acoustic emission (AE) 센서나 광섬유센서가 가장 적합한 것으로 널리 알려져 왔다. 그 중 광섬유센서는 기존의 센서에 비하여 전자기장에 영향을 받지 않으며, 경량, 소형이고 다량의 정보수송능력이 있으며, 복합재 구조에 매우 적합하여 동일한 센서로 cure monitoring과 health monitoring에 함께 사용할 수 있기에 여러 형태의 광섬유센서가 개발되고 있으며, 이를 이용한 복합재료의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

복합재료에 관한 연구에서 미시역학의 중요성은 구미에서 널리 인식되어 그에 관한 연구들이 다수 진행되고 있다. 미시역학에 관한 시험법으로는, pull-out 시험법,^{5,6} single fiber composites (SFC) 시험법,⁷⁻⁹ 그리고 microindentation 시험법¹⁰ 등이 있다. Pull-out 시험법은 실험 그 자체의 단순함 때문에 널리 이용되고 있으나, 실험상의 문제로 인해 얻어진 데이터가 큰 분포를 가지는 단점을 가지고 있다. 이에 비하여, 본 연구에서 사용한 SFC 시험법(혹은 fragmentation 시험법이라고도 함) 열경화성 복합재료, 특히 에폭시수지에 많이 이용되고 있었으며, 열가소성수지 복합재료에서는 별로 없는 실정이다.¹¹

SFC 시험법의 원리는, Kelly와 Tyson의 모델을¹² 응용하여, SFC 시편이 당겨질 때, 인장응력은 계면에서 전단응력을 통하여 섬유로 전달되며, 응력이 섬유의 끝에서부터 파괴응력에 도달할 때까지 형성된다는 것을 기본적으로 적용한다. 이 방법은 분석하기는 다소 복잡하지만 적은 수의 실험으로 풍부한 정보를 얻을 수 있으며, 또한 실제의 복합재료 상태에 더욱 유사하다는 장점을 가지고 있다.

SFC 시험법을 연구하고 있는 여러 그룹중에서, Drzal은¹³ 편광이 달린 광학현미경을 통하여 부서진 섬유파편들의 수를 세고, 길이를 측정하기 위해 특별히 제작된 용력부가장치에 의한 SFC 시험법을 탄소 섬유-에폭시수지 시스템에 사용했다. 평균섬유 파단 길이와 평균섬유강도에 대해서 각각의 두 Weibull 분포를 결합하여 계면전단강도 (IFSS)를 구하는데 사용했다. 다른 연구에서, Subramanian 등은^{8,14} 상대변수로서 섬유인장강도와 섬유파편의 임계형상비를 고려하여 두 변수를 가진 lognormal 분포를 이용함으로써 계면전단강도의 분포를 구하였다. 또한, Netrevali 등이 통계적인 Monte-Carlo 방법을 이용하여 아주 구체적으로 이 시스템을 연구한 바 있다.¹⁵

본 연구의 목적은, SFC 시험법을 이용하여 현재와 미래의 지능형 sensor 소재로 주목을 받고있는 광섬유센서를 시편 내부에 함몰시킨 단섬유강화 복합재료에, 이미 널리 알려진 또 다른 비파괴 시험법인 AE를 측정하기 위해 압전형 AE센서를 동일한 시편의 표면 중앙에 동시에 부착하여, 얻어진 데이터를 각각 다른 방법으로 분석하여 복합재료의 섬유와 고분자 수지의 계면전단강도를 정량적으로 계산하며, 미세파괴기구를 규명하는데 있다. 이들을 역학적인 특성과 관련시켜서 미세시편으로부터 얻은 정량적인 계면특성에 대한 결과를 거대시편인 laminate에도 적용시킬 수 있으며, 또한 이 방법을 응용하여 능동적으로 제어할 수 있는 지능형 복합재료를 만드는데 중요한 기여를 할 수 있을 것이다.

기본적인 실험방법은, 한 가닥의 광섬유센서를 먼저 단섬유 복합재료인 SFC 시편 내부에 평행하게 함몰시켜 변성된 에폭시수지로 제조한 SFC 시편을 특별하게 제작된 인장시험기를 이용하여 강화섬유가 여러 차례 파단될 때까지 하중을 가하고, 섬유의 파단과 섬유-기지 계면의 분리에 따라 발생하는 탄성파인 AE를 동일한 조건하에서 동시에 측정함으로써, 두 가지 센서에서 얻어진 결과를 비교 분석하여, 모형 복합재료인 SFC 시편내의 미세파괴기구를 조사하는 것이다.

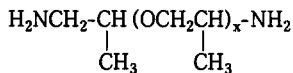
실 험

재 료.

섬유: 본 연구에 사용된 강화섬유는 모두 SiC 섬유

로서 일본의 Nippon Carbon사 제품인 Nicalon이라는 상품명에 갖는 평균직경이 13.6 μm 인 SiC 섬유와, 미국의 Textron사의 제품인 SCS-6라는 상품명에 갖는 평균직경이 137 μm 인 SiC 섬유를 사용하였다. 전형적인 Nicalon Fiber는 Si 58.3, C 30.4, O 11.1%, 그 외 기타 성분으로 구성되어 있으며, 한 토우에 500 filament를 갖는 형태의 것을 사용하였다. Core 부분에 텅스텐이 존재하는 SCS-6는 연속적인 silicon carbide 섬유의 woven preform 형태로부터 뽑아내었다. 이들 두 가지 섬유는 미처리된 것을 사용하였다.

매트릭스: SFC 시편의 제작을 위해 국도화학에서 생산된 YD-128이라는 상품명에 갖는 에폭시를 매트릭스로 사용하였다. YD-128은 bisphenol-A의 diglycidylether (DGEBA)가 기저물질로 되어 있는 것이다. 경화제로는 polyoxypropylenediamine의 일종인 Jeffamine D400과 D2000 (Huntsman Petrochemical Co.)이 사용되었는데, D400과 D2000의 혼합비율을 조절하여, 유연성을 조절하였다. 본 연구에서는 직경이 큰 섬유를 사용하기 때문에 기지가 섬유보다 먼저 파단되는 것을 막기 위해 매트릭스의 유연성을 증가시켰다. Jeffamine 경화제의 구조식은 다음과 같다.



여기서, x는 D400의 경우 약 5.6이며, D2000의 경우는 약 33.1이다. 수지와 경화제를 교반한 후 경화한다. 경화조건은 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간동안 전 경화(precuring)하고, 120 $^{\circ}\text{C}$ 에서 한시간동안 후 경화(postcuring)했다. m-phenylenediamine (mPDA) 경화제는 비교를 위해 사용하였다.

광섬유: 본 연구에서 광섬유는 SiC 섬유와는 달리 센서 역할을 하며 주성분은 germanosilicate glass이다. 실험에서 사용한 길이 3m의 광섬유 중앙부에는 Fiber Bragg Grating (FBG) sensor (Innovative Fibers Inc., Canada)가 들어있는데, FBG 센서의 원리는 광섬유의 core에 일정한 간격의 격자를 Fig. 1과 같이 새겨 넣음으로써 굴절율이 주기적으로 변화하도록 한 것이다. 광대역의 빛을 광섬유의 한쪽

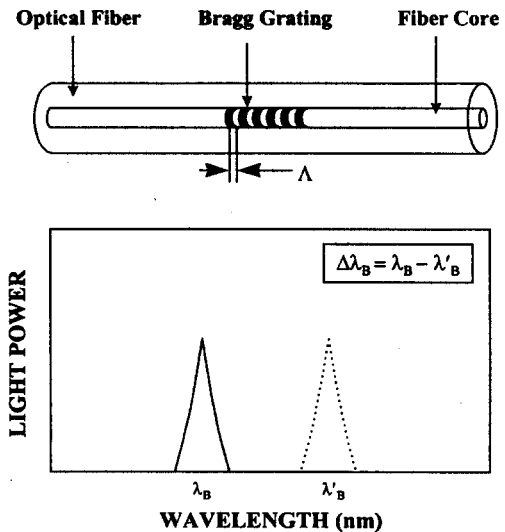


Figure 1. The structure and measurement principle of Fiber Bragg Grating (FBG) sensor.

끝으로부터 입사하면 격자에서 그 일부는 반사되고 일부는 통과하는데 다음 식과 같이 Bragg조건을 만족하는 파장일 때 constructive interference를 형성하게 되고 이는 곧 photodetector에서 탐지되는 신호가 된다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

여기서 n_e 는 FBG 센서 격자의 유효굴절율 (effective refractive index)이고 Λ 는 격자의 간격이다. 따라서 Bragg조건을 만족하는 Bragg파장은 유효굴절율과 격자간격의 함수임을 알 수 있는데, 광섬유 격자에 온도의 변화나 스트레인 등의 외란이 가해지면 우선 격자의 간격이 달라지고 유효굴절율도 변하여 Bragg파장이 달라지게 된다. Bragg파장의 변화를 측정함으로써 이론적으로는 다음과 같은 식을 이용하여 외란의 크기를 알 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_e) \Delta \epsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서, p_e 는 광탄성상수이고 p_{11} 과 p_{12} 는 광학적

스트레인 텐서 (strain-optic tensor)의 성분이며 n 은 광섬유 코어의 굴절율, ν 는 Poisson's ratio이다.

본 연구에서는 FBG센서를 이용하여 단섬유강화 복합재료의 미세 파괴 과정을 관찰하는 것이 목적이므로 실험조건에서 온도의 변화는 고려하지 않는다. 따라서 식 (2)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있으며, SiC 강화섬유의 파단이나 섬유-기지 계면의 debonding과 같은 외란에 의한 미소한 스트레인의 변화를 이를 통하여 측정할 수 있다.¹⁶

$$\epsilon = \frac{\Delta \lambda_B / \lambda_B}{(1 - \nu_e)} \quad (4)$$

실험에서는 캐나다의 Innovative Fibers사에서 구입한 fiber type이 SMF-28인 것 3개를 사용하였는데, FBG센서의 표준상태 Bragg wavelength가 약 1534 nm로 infrared에 해당한다. SMF-28의 자세한 특성은 Table 1과 같다. SMF-28은 섬유 중앙부에 센서가 포함되어 있고 폴리이미드로 피복되어 있는데, 시편 제작에 어려움이 많아 센서 부분의 피복을 제거하지 않고 바로 사용하였다.

방 법.

Single Fiber Strength의 측정: 직경이 $13.6 \mu\text{m}$ 인 SiC 섬유의 시편은 5개의 gauge 길이에서 측정되었는데, gauge 길이는 각각 2, 5, 10, 20 그리고 100 mm였고, 직경이 $137 \mu\text{m}$ 인 SiC 섬유의 시편은 실험상의 어려움으로 인해 10, 20 및 40 mm의 3가지 gauge 길이로 측정하였다. 시편은 gauge 길이를

Table 1. Characteristics of Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor

index	sample
grating type	FBG-1534.5-70-0.1
grating number	STL-181-2
center wavelength (nm)	1534.09
FWHM (nm)	0.12
peak reflectivity (%)	75
fiber type	SMF-28
fiber pigtails (m)	3

갖는 paper frame의 중간에 섬유가 오도록 고정된 후, 섬유의 양 끝을 에폭시 접착제로 접착시켜 제조하였다. 이 접착제는 상온에서 12시간동안 경화시켰다. 섬유의 직경은 미세눈금이 있는 대안렌즈가 부착된 편광현미경으로 측정하였다. 인장강도는 10 N의 load cell이 부착된 Lloyd Instrument사의 만능시험기 (UTM Model LR-5K)를 사용하여 측정하였고, crosshead speed는 0.5 mm/min이었다.

Triple Fiber Composites (TFC) 시편의 제조: 본 연구에 사용된 시편은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 두께가 약 1 mm, 그리고 gauge length가 25 mm인 dumbbell형의 시편이다. Dumbbell형의 silicon mold에 직경이 $13.6 \mu\text{m}$ 와 $137.6 \mu\text{m}$ 인 두 가지 SiC 섬유와 광섬유를 고정시키고, Jeffamine 경화제와 교반되어 유연화된 에폭시를 부은 후, 80 °C에서 2시간 그리고 120 °C에서 1시간동안 경화하여, FBG센서가 내장된 광섬유를 포함하고, SiC 섬유로 강화

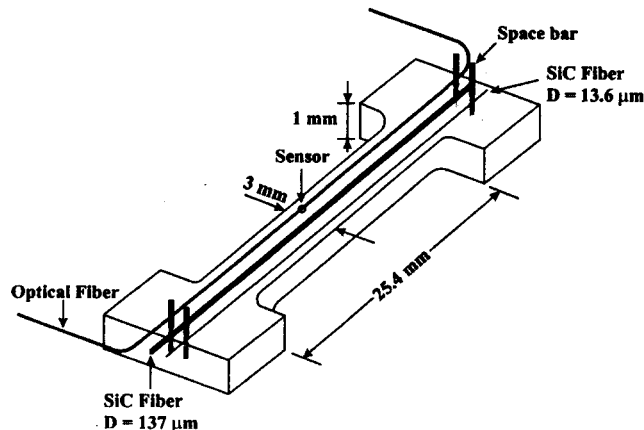


Figure 2. Dimension of the dogbone-shaped dual fiber composites specimen with an embedded fiber-optic sensor.

된 TFC 시편을 제조하였다. 에폭시 유연성의 적정 조건을 구하기 위해 경화제의 혼합 비율을 다르게 하여 순수 에폭시 시편을 제작하였다. 이 시편을 1 kN의 load cell이 부착된 UTM을 사용하여 위와 동일한 방법으로 측정하였으며, 이 때 crosshead speed는 1 mm/min이었다.

계면전단강도 (IFSS)의 측정: 광섬유가 함침된 TFC 시편의 계면전단강도의 측정에는 특별하게 고안된 인장시험기와 편광현미경이 사용된다. 인장시험기에 TFC시편을 고정시키고, 편광판이 부착된 광학현미경에 장착한 후, 시편의 상태와 미세파괴 형태를 관찰하면서 서서히 인장하중을 가한다. 시험하는 동안에 인장하중을 증가시키면 기지를 통하여 섬유로 응력이 전달되고, 점차적으로 섬유의 fracture 현상이 생긴다. 본 연구에서는 섬유의 fracture 과정이 더 이상 일어나지 않을 때까지 응력을 가한 후, 파단된 섬유 파편의 길이를 측정하였다. 섬유의 최종적인 파단길이를 임계파단길이(l_c)라고 하는데, 이것과 fracture 과정은 편광현미경으로 측정된다.

계면전단강도를 구하는 Kelly-Tyson식을 통하여, 섬유인장강도(σ_f)와 형상비 (aspect ratio, l_c/d), 그리고, IFSS (τ)와의 관계는 아래와 같다.

$$\tau = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot l_c} \quad (5)$$

한편 Drzal은 고전적인 Kelly-Tyson식의 문제점 즉, 계산에 의해 구해진 계면전단강도의 오차를 지적하고, 통계적인 Weibull 분포를 도입하여 새로운 개념의 계면전단강도 계산식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\tau = \frac{\sigma_f}{2 \cdot \alpha} \cdot \Gamma \left[1 - \frac{1}{\beta} \right] \quad (6)$$

여기서, α 와 β 는 각각 형상비에 대한 Weibull 분포함수에서의 scale 변수와 shape 변수이고, Γ 는 Gamma 함수이다.

계면전단강도를 구하는데 있어서 또 다른 중요한 항이 섬유의 인장강도이다. 실제로 임계파단길이의 값은 수 백 micrometer 정도인데, 이렇게 아주 작은 gauge 길이에서 직접적으로 섬유의 인장강도를 측정

하는 것은 불가능하다. 따라서 측정 가능한 몇 개의 gauge 길이에서 측정된 섬유의 인장강도로부터 외삽하여 임계파단길이에서의 섬유인장강도를 비교적 정확하게 알아내는 방법이 사용되는데, 이것이 Weibull weakest link rule이다. 최종적으로 임계파단길이에서의 섬유인장강도는 아래와 같이 정의된다.

$$\sigma_f = \sigma_0 \cdot \left(\frac{l_c}{l_0} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (7)$$

여기서, σ_0 는 평균임계 파단길이(l_c)와 가장 근접한 값을 갖는 gauge 길이(l_0)에서의 섬유인장강도이고, ρ 는 섬유강도에 대한 Weibull 분포에서의 shape 변수이다.

FBG 및 AE를 통한 미세파괴 측정: 본 연구에서는 인장하중에 의한 복합재료의 미세파괴 과정을 측정하기 위하여 Bragg wavelength, AE, 및 strain을 측정하고 세 가지 데이터를 비교 검토함으로써 미세파괴 기구에 대한 보다 정확한 이해를 구하고자 하였다. Fig. 3은 이러한 목표를 달성하기 위하여 수행한 인장시험에 사용된 측정장치의 개요를 보여준다.

시편의 크기가 폭 3 mm, 길이 45 mm 정도로 매우 작으므로 기존의 재료시험기를 사용할 수 없으므로 특별히 고안하여 자체적으로 제작한 인장시험기를 사용하였다. 시험기에는 crosshead speed를 제어할 수 있는 장치가 없으며, 응력도 측정하지 않고 다만 전체적인 변위를 다이얼 게이지로 확인하도록 하였다. 변형도에 대한 보다 정확한 정보를 위해 시편에 strain gauge를 부착하였고, 광섬유는 강화섬유들(SiC 섬유)과 평행하게 미리 매몰되어 있으며, 최종적으로 AE 센서를 부착하였는데 실제로는 지름 15 mm의 AE 센서 위에 시편의 gauge 길이 대부분이 놓여있는 조건이 된다.

측정장치 중 optical spectrum analyzer를 비롯한 Bragg wavelength 측정은 대한항공 연구소가 보유한 시설을 활용하였으며, AE 데이터의 수집과 분석에는 미국 Physical Acoustics사 제품인 AEDSP 32/16 분석장치(model MISTRAS 2001)를 비롯하여 true RMS voltmeter (HP 3400A), digital storage oscilloscope (LeCroy 3504A) 등을 사용하였다. 그림에서 나타낸 바와 같이 AE RMS voltage

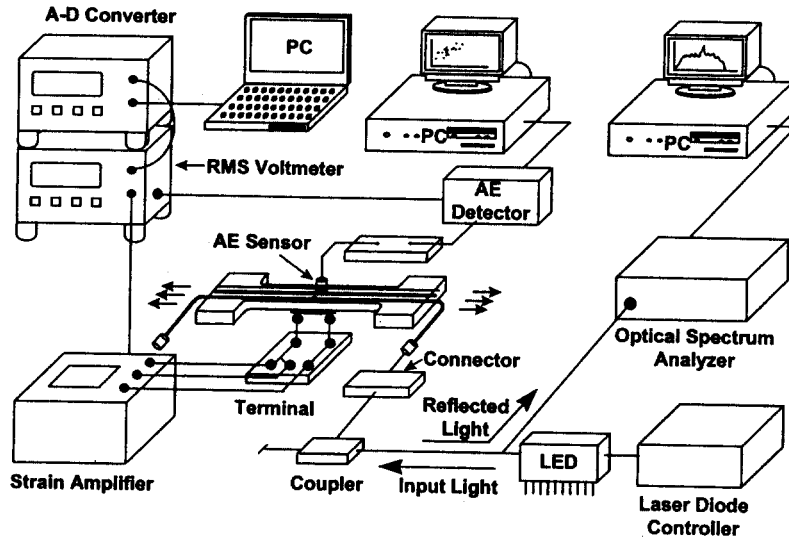


Figure 3. Schematic diagram of the instrumentation for tensile testing using micro-composite specimens including FBG, AE, and strain gauge sensors.

와 스트레인 데이터는 0.5초 간격으로 읽어들이면서 실시간에 노트북 PC에 그릴 수 있으며, Bragg wavelength와 스트레인 또는 Bragg wavelength와 AE RMS voltage 사이의 상관성은 실험이 끝난 후 데이터를 따로 처리하여 얻을 수 있다. 이는 optical spectrum analyzer가 매우 고가임에도 불구하고 기껏해야 4~5초에 한번씩 데이터를 읽을 수 있기 때문이기도 하다.

AE는 고체 내에 형성되었던 스트레인 에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파를 말하며, 본 연구에서처럼 외란에 의해 복합재료 중의 섬유가 파단되거나 섬유-기지 계면이 분리되는 경우 거의 틀림없이 측정 가능한 크기의 신호를 발생한다. 고체를 전파하는 탄성파는 시간에 따라 변하는 미소 변위라 할 수 있으므로 시편의 표면에 부착된 압전 (piezoelectric) 센서에 의해 전기신호로 측정될 수 있다. 이렇게 측정된 AE 신호를 분석함으로써 고체 내부에서 발생한 미세한 변형이나 파괴를 다른 어떠한 방법보다도 일찍 포착할 수 있다. 이것은 압전센서를 활용하는 AE 측정의 감도가 최대 10^{-12} m로 매우 작은 변화에도 예민하기 때문이다. 이러한 고감도는 그러나 주변의 온갖 잡음도 모두 함께 받아들일 가능성이 높은 것을 의미하며, 따라서 AE 측정에서는 측정 그 자체보다는 사후

의 데이터 분석에 매우 신중해야 한다.

결과 및 고찰

SiC 섬유의 인장강도에 대한 통계적 분석 및 최적에폭시 기지의 선정. 대부분의 세라믹 섬유의 인장강도는 gauge 길이에 의존하는데, 이는 섬유 표면에 존재하는 flaw의 확률이 섬유의 길이나 두께에 의존하기 때문이다. SiC 섬유도 세라믹 섬유로서 예외가 아니며, 표면 산화나 표면에 존재하는 flaw 때문에 인장강도가 저하되는 경향을 보인다. Table 2와 Table 3은 섬유직경이 $13.6 \mu\text{m}$ 와 $137 \mu\text{m}$ 인 SiC 섬유의 각 gauge 길이에 따른 인장강도와 연신율을 보여주는 데이터이다. 인장강도는 두 경우 모두 넓은 분포를 보이는데, 이는 한 개의 섬유내에서 임의로 분포되어 존재하는 defect와, 측정된 다른 섬유들간의 불균일성에 기인한 것으로 사료된다. 그리고, gauge 길이가 감소함에 따라 인장강도와 파단 연신율이 증가함을 보여주었는데, 이는 섬유의 표면에 불균일하게 존재하는 flaw에 기인하기 때문으로 생각된다. 만약, unimodal 대신에 bimodal 분석을 사용한다면, 섬유강도 분포는 각 gauge 길이에서 다른 형태의 bimodality를 보여줄 수도 있을 것이다.

Table 2. Tensile Strength and Elongation of the SiC Fiber with Diameter 13.6 μm at Various Gauge Lengths

gauge length (mm)	No. of specimen (ea)	diameter (μm)	tensile strength (MPa)	elongation (%)
2	35	13.3(2.1) ^a	3498(1212) ^a	4.5(1.9) ^a
5	43	13.6(2.4)	3299(847)	2.5(0.7)
10	34	14.0(1.8)	3175(1052)	2.3(0.9)
20	39	13.5(2.3)	2666(707)	1.4(0.3)
100	40	13.6(1.9)	2108(617)	0.9(0.2)

^a Standard deviation.

Table 3. Characteristics of Fiber Bragg Grating sensor

gauge length (mm)	No. of specimen (ea)	diameter (μm)	tensile strength (MPa)	elongation (%)
10	32	137.0(0.2) ^a	3740(590.4) ^a	4.1(0.3) ^a
20	35	136.9(0.3)	3613(453.3)	4.4(0.5)
40	27	137.1(0.3)	2180(516.7)	2.6(0.6)

^a Standard deviation.

Table 4. Statistical Distribution Parameters for the Single Fiber Strength in the SiC Fiber ($d = 13.6 \mu\text{m}$)

gauge length (mm)	normal		lognormal		Weibull		
	mean (MPa)	S.D.	mean (MPa)	S.D.	mean (MPa)	Weibull scale parameter (α)	shape parameter (β)
2	3498	1212	3786	1161	3795	4145	3.69
5	3299	847	3306	898	3300	3630	4.28
10	3175	1052	3182	722	3171	3510	3.38
20	2666	707	2668	698	2664	2940	4.83
100	2171	617	2109	614	2070	2276	4.00

Table 4는 섬유직경이 13.6 μm 인 SiC 섬유의 평균 인장강도와 통계분포변수들을 세 가지 다른 형태의 통계처리를 이용하여 나타내었다. 여기서 통계처리 방법은 섬유강도에 대한 normal, lognormal, Weibull 분포들이 사용되었다. Fig. 4는 섬유직경이 13.6 μm 인 SiC 섬유의 경우, Weibull 분포를 이용하여 각 gauge 길이에 따른 강도를 도시한 그림이다. Gauge 길이가 증가할수록 인장강도 분포가 감소하고, 밀도함수가 증가하는 경향을 볼 수 있다.

Table 5와 Fig. 5는 섬유로 보강하지 않은 순수

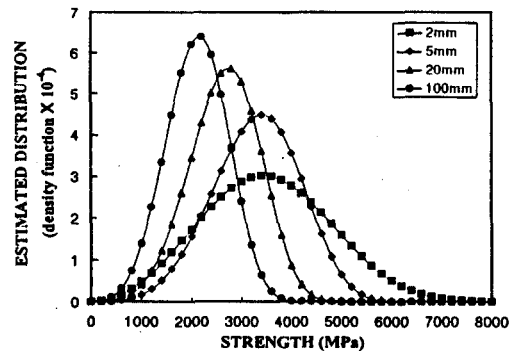


Figure 4. Weibull distributions for the 13.6 μm SiC fiber strength at various gauge lengths.

Table 5. Mechanical Properties of the Neat Epoxy Specimens with Various Curing Agents

curing agent	No. of specimen (ea)	tensile strength (MPa)	modulus (GPa)	strain at breakage (%)
mPDA	4	84.2(70) ^a	2.52(0.4) ^a	5.5(0.8) ^a
D400 ¹⁾	6	41.4(3.8)	2.00(0.2)	8.8(2.6)
D400 + D2000 ²⁾	6	35.8(6.6)	1.76(0.2)	40.5(3.8)
D400 + D2000 ³⁾	6	24.6(1.9)	1.56(0.2)	66.6(5.2)

^a Standard deviation.

- mPDA : brittle resin.
- D400, D2000 : modified and flexible resin.
- 1) D400 = 3 g
- 2) D400 : D2000 = 2.8 g : 0.2 g.
- 3) D400 : D2000 = 2.5 g : 0.5 g.

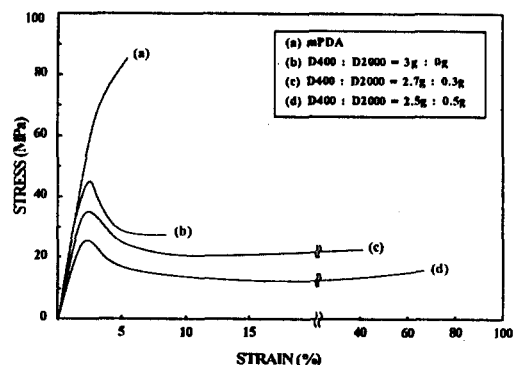


Figure 5. Engineering stress-strain plots for neat epoxy specimens using four different formula of curing agents.

에폭시 시편에 경화제의 함량을 달리하여 경화시킨 후, 각각의 경화제 함량 조건에 따른 역학적 특성과

응력-변형 곡선을 보여주고 있다. 이것을 통해 본 실험에 사용되는 매트릭스의 적정 조건을 찾을 수 있는데, 시편의 두께가 1 mm 정도인데 반해 두꺼운 SiC 섬유와 광섬유가 사용되므로, 취성보다는 연성이 큰 물성이 요구된다. 매트릭스가 취성이 크면 연신율이 작아서 실험 도중에 시편의 파단이 우려되므로, 비교적 연신율이 큰 (d)의 경우를 적정 조건으로 하여 시편을 제작하였다. (d)의 큰 연신율에서는 strain hardening을 보여 주었다.

SiC 섬유/에폭시 복합재료의 계면전단강도와 계면 관찰. Table 6은 섬유직경이 13.6 μm 인 SiC 섬유/에폭시 복합재료의 형상비에 대한 Weibull 변수와 계면전단강도를 보여준다. 식 (5)에 나타난 Kelly-Tyson식에 평균 섬유인장강도와 임계파단길이를 그대로 대입하여 계면전단강도를 얻었으며, 식 (6)에 나타난 Drzal식은 Weibull 분포를 이용하여, 형상비에 대한 scale 변수, α 와 shape 변수, β 를 구한 후, 이를 식 (6)에 대입하여 계면전단강도를 얻었다.

Drzal식에서 구한 계면전단강도는 26.8 MPa, Kelly-Tyson식을 통해 구한 계면전단강도는 23.5 MPa이었다. 여기서, 같은 시편으로부터의 결과임에도 Drzal식에서 구한 계면전단강도가 Kelly-Tyson식으로 구한 경우보다 약간 더 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 측정치의 값을 그대로 대입하여 구한 방법보다 통계처리에 의한 신뢰도를 높인 때문이라고 고려된다.

Fig. 6은 광섬유가 함께 매몰된 SiC 섬유/에폭시 복합재료의 DFC 시편을 인장시험한 후, 섬유들의 파단 현상을 보여주는 사진인데, (a)는 편광이 없는 상태이고, (b)는 편광이 있는 상태이다. Fig. 6(a)에서는 섬유의 파단을 확인할 수 없으나, 편광이 존

재하는 Fig. 6(b)에서는 섬유의 파단과 파단 주위에서의 응력 분포를 잘 확인할 수 있었다. Fig. 6의 사진을 통해 13.6 μm 인 SiC 섬유, 137 μm 인 SiC 섬유, 그리고 광섬유 모두에서 최종적인 섬유파단이 일어났음을 볼 수 있다.

FBG, AE 및 Strain Sensors 출력의 비교검토. 인장하중을 가하는 소형 시험기를 자체적으로 제작하였기 때문에 crosshead speed는 수동으로 조절하며, 따라서 변형속도를 최대한 일정하게 유지하도록 노력하였으며 Fig. 7이 그 결과를 보여준다. 그림에서 실선으로 나타난 곡선이 시간에 따른 변형의 변화이며, 점선으로 나타난 곡선이 AE RMS voltage이다. 약 2300 μe 에서 strain gauge의 점착이 파손될 때까지 변형이 대체로 선형적으로 증가함을 볼 수 있으며, 이때 시간은 실험 개시 후 약 255초 경과한 시점이다. AE RMS voltage 곡선에 보이는 여러 개의 피크들은 그 시점에서 매우 큰 에너지를 갖는 AE 신

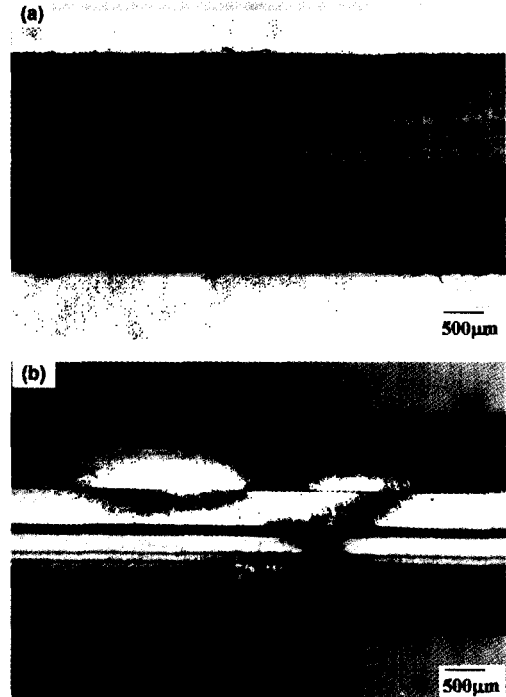


Figure 6. Optical micrographs of the fractured dual fiber composites containing three embedded fibers: (a) without polarized-light and (b) with polarized-light.

Table 6. Weibull Distribution Parameters for the Aspect Ratio and IFSS in the SiC Fiber ($d=13.6 \mu\text{m}$)/Epoxy Composite

diameter (μm)	aspect ratio (l_c/d)	scale parameter ^a (α)	shape parameter ^b (β)	IFS (MPa)	
				Drzal ^c	Kelly-Tyson ^d
13.6	87.9	97.8	3.6	26.8	23.5

^{a, b} Weibull parameters for the aspect ratio.

^c Drzal equation : $r = \sigma_f / (2 \cdot \alpha) \cdot \Gamma[1 - 1/\beta]$.

^d Kelly-Tyson equation : $r = (\sigma_f \cdot d) / (2 \cdot l_c)$.

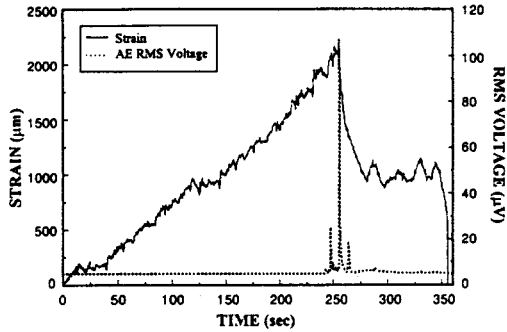


Figure 7. Strain gauge output and AE RMS voltage versus the elapsed testing time.

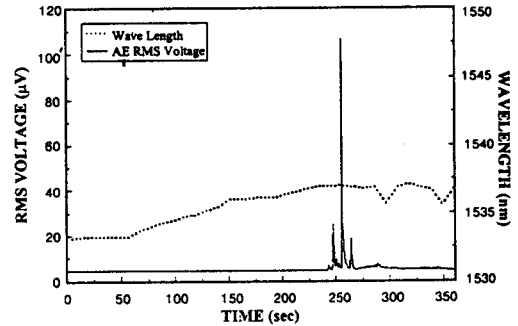


Figure 8. Bragg wavelength and AE RMS voltage versus the elapsed testing time.

호가 탐지되었음을 나타낸다. 따라서 255초 부근의 가장 큰 피크는 strain gauge의 접착이 파손됨에 따라 발생한 것으로 추정되며, 전후에 하나씩 보다 작지만 뚜렷하게 나타난 두 개의 피크는 137 μm 의 SiC 섬유가 파단되면서 발생한 것으로 판단된다.

이에 대응되는 과정을 FBG 센서로 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서는 AE RMS voltage를 실선으로, FBG 센서의 출력, 즉 Bragg wavelength를 점선으로 표시하였다. Strain gauge의 출력과는 달리 FBG 센서의 출력은 AE 신호로부터 예상된 섬유의 파단이나 심지어 strain gauge 접착의 파손과 같은 매우 큰 외란에도 비교적 둔감함을 알 수 있다. 이는 FBG 센서의 본질적인 특성이라 할 수 있으며, 본 연구의 초기에 FBG 센서를 AE 센서 대신 사용할 수 있을 것으로 기대한 것이 상당히 빛나간 것임을 의미한다. 즉, FBG 센서는 기본적으로 외란에 의한 격자 간격의 변화 즉, 변형을 측정하는데 유효한 것이며, AE 처럼 고체내를 전파하는 탄성파가 갖는 과도적인 (transient) 미소변위를 측정하는데는 적합하지 않는 것으로 사료된다.

FBG 센서의 활용범위를 정량적으로 알아보기 위하여 strain gauge 출력에 대한 Bragg wavelength의 변화를 Fig. 9와 같이 나타내었다. 이 데이터로부터 FBG 센서를 이용한 측정범위는 약 450~1050 μE (또는 1533.5~1536 nm)임을 알 수 있는데, 이는 예상보다 매우 좁은 범위이므로 금속이나 고분자와 같은 재료의 소성변형 등에는 적합하지 않고 취성재료의 변형이나 피로파괴처럼 변형량이 작은 현상에 유효할 것으로 사료된다. 위에서 언급한 바 가장 민감한 구

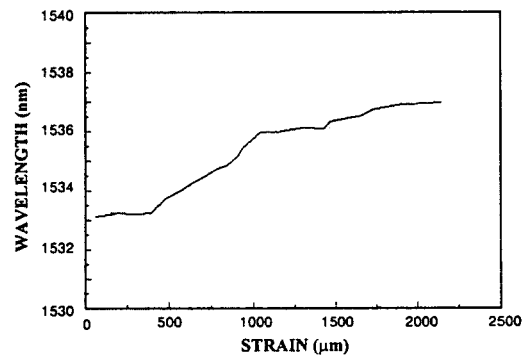


Figure 9. Bragg wavelength as a function of longitudinal strain.

간의 기울기가 약 $4 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\text{E}$ 정도이다.

AE 결과의 분석 및 검토. AE 시험의 전반적인 결과는 Fig. 9로 압축될 수 있다. 그러나 보다 미세한 분석을 위해서는 AE 신호분석기인 AEDSP가 필요하다. 이 절에서도 같은 시편으로부터 획득된 AE 데이터를 집중적으로 분석하였다. Fig. 10(a)는 시험 개시에서 종료까지 약 350초 동안에 탐측된 AE 신호의 수(hit)의 누적과, (b) 시간에 따른 신호 진폭의 변화를 보여준다. 235초 부근에서 AE 신호가 발생하기 시작하여 약 250초 근방까지 급격한 증가를 보이다가 이내 완만한 증가세로 돌아서고 있음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 9의 변형 곡선에도 약간의 변화를 볼 수 있지만 불행히도 약 255초가 지났을 때 strain gauge 접착이 떨어짐으로써 이후 변화는 알기 어렵다.

한편 Fig. 11은 Fig. 10에서처럼 획득한 688개의

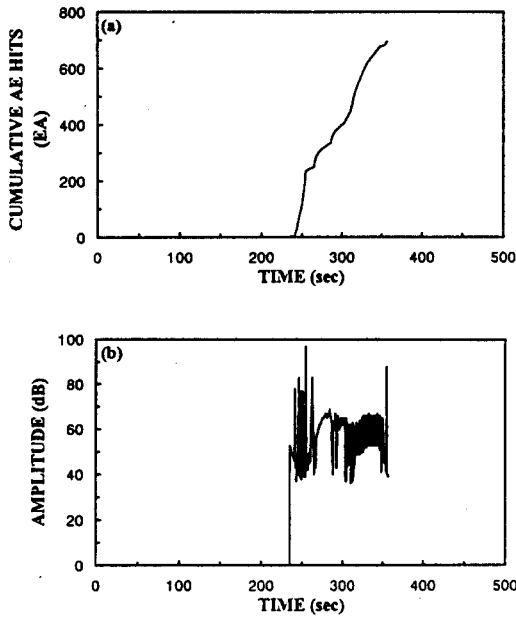


Figure 10. AE data acquired during the tensile testing using TFC specimens: (a) cumulative AE hits versus time and (b) signal amplitude versus time.

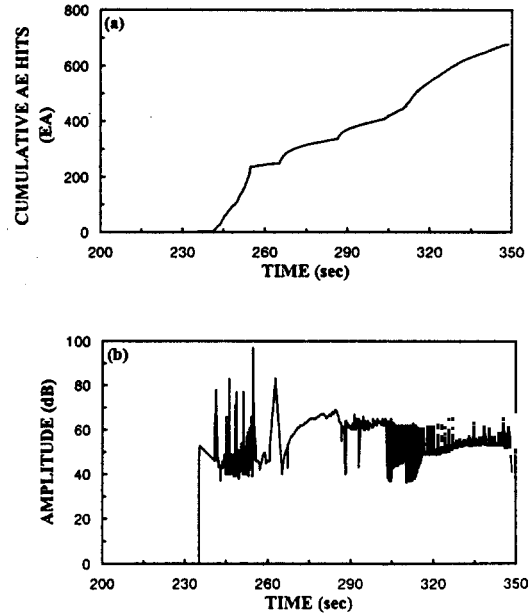


Figure 12. AE data acquired during 200-350 seconds by the tensile test: (a) cumulative AE hits versus time and (b) signal amplitude versus time.

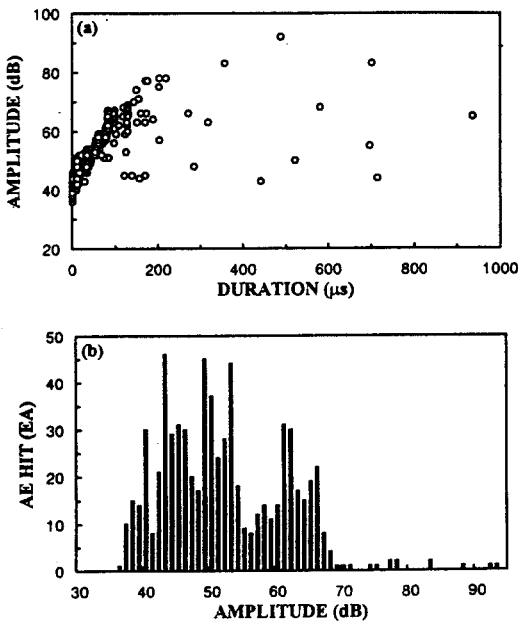


Figure 11. Distribution analysis of AE signals: (a) a cross-plot of amplitude versus duration and (b) AE hits versus amplitude.

AE 신호를 (a) 신호진폭과 신호 지속시간의 cross plot으로 분석하고, (b) 개별 신호의 진폭 분포를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 신호진폭의 분포를 자세히 살펴보면 대체적으로 37~55 dB와 55~67 dB의 bimodal 분포를 나타내고 있으며, 아주 적은 수의 신호가 70~92 dB에 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에서 200초까지는 AE 데이터에 근거할 때 아무런 변화도 없었음을 알 수 있으므로, Fig. 12 부터는 200~350초 구간만을 집중 분석해 보기로 한다. Fig. 12로부터 알 수 있는 사실은 첫째 200~263초 구간과 265초 이후 구간은 매우 뚜렷하게 구분된다는 점이다. 따라서 이후 분석에서는 200~263초 (실제로는 235~263초) 사이를 구간 A, 265~345초 사이를 구간 B로 하여 비교 분석하였다. 345초 이후를 삭제한 것은 최종 파단의 순간에서 발생하는 충격파는 미세파괴와는 관련이 없는 잡음(noise)에 불과하기 때문이다.

Fig. 12의 구간 A와 B에서 탐측된 각각의 신호집단에 대하여 Fig. 11에서와 같이 신호진폭과 지속시간을 중심으로 분석을 행한 결과는 Fig. 13 및 Fig. 14

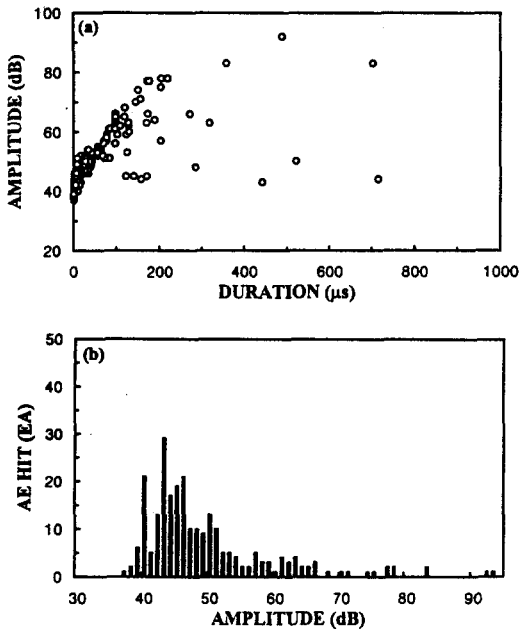


Figure 13. Distribution analysis of AE signals acquired from 0-263 seconds period of Fig. 12: (a) a cross-plot of amplitude versus duration and (b) AE hits versus amplitude.

와 같다. 이 결과로부터 숫자는 적으나 매우 강한 70~92 dB의 신호와 37~55 dB에 속하는 미약한 신호 집단은 주로 구간 A에서 발생한 반면, 구간 B에서는 주로 50~67 dB의 중간 크기의 신호들이 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 두 가지 분류의 신호집단은 신호 지속시간에서도 매우 뚜렷한 차이를 보이는데 구간 B에서 발생한 신호들은 주로 100 μ s 이하의 짧은 지속시간을 보이는 반면, 구간 A에서 발생한 신호들은 수 μ s에서 700 μ s까지 다양한 분포를 보이고 있다. 이 중에서 관심이 집중되는 개별 신호를 분석하려면 신호의 진폭, 지속시간, 에너지, 상승 시간 등의 AE 변수들을 기록하는 기능이 있으므로 이를 이용한다.

특히 구간 A에서 발생한 신호 가운데서 83 dB의 진폭을 가진 신호 2개를 조사한 결과 이는 틀림없이 지름 137 μ m의 SiC 섬유가 파단될 때 발생한 AE로 판정할 수 있었다. 그 이유로는 신호의 진폭과 에너지가 다른 신호들보다 월등하게 크며, 계산상으로도 임계형상비는 대략 20~150이므로 임계파단길이는

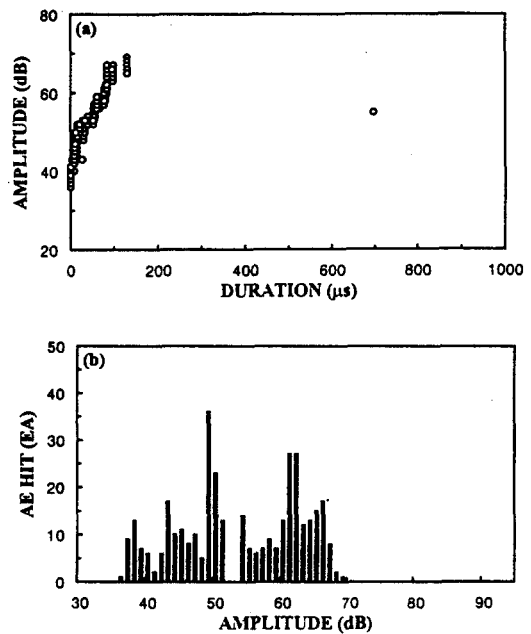


Figure 14. Distribution analysis of AE signals acquired from 265-345 seconds period of Fig. 12: (a) a cross-plot of amplitude versus duration and (b) AE hits versus amplitude.

최소한 2.7 mm 정도인 반면 시편의 길이는 고작 45 mm 정도에 불과한 때문이다. 즉, 시편 내에서 지름 137 μ m의 SiC 섬유는 고작 한 두 군데만 파단될 것이라는 점과 일치하고 있는 것이다.

Fig. 15에는 262.7초 부근에서 탐측된 AE 신호의 파형과 주파수 스펙트럼을 보여준다. 개별 신호의 기록에 의하면 신호의 지속시간은 358 μ s이지만 여기서는 처음 256 μ s만 나타내고 있으며, 신호의 100 kHz~1 MHz에 걸친 비교적 넓은 주파수 성분은 신호의 에너지가 실려 있는 사실을 알 수 있다. 한편 지름 13.6 μ m의 SiC 섬유는 임계파단길이가 0.27 mm 정도이므로 이론상으로는 최대 20개의 파단이 가능하다. 77 dB 이하의 비교적 높은 진폭의 신호들이 이의 파단에 관련된 것으로 추정할 수 있다.

구간 B에서 집중적으로 발생한 신호들은 그 파형의 특징상으로도 발생한 시간상으로도 섬유의 파단보다는 섬유-기지 계면의 분리나 섬유 뿔뿔의 과정에서 마찰에 의해 발생하는 신호집단으로 추정할 수 있다. 이는 Fig. 12에서 265초 이후 끝까지, 특히 약 310

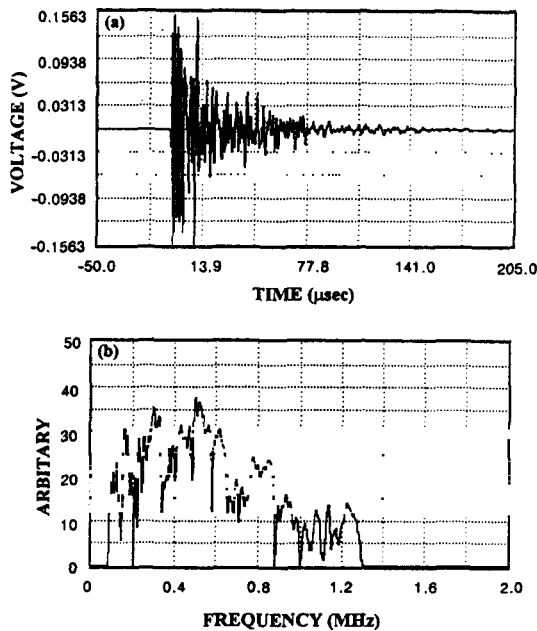


Figure 15. An AE signal acquired during the first period of tensile test at 262.7 seconds: (a) waveform and (b) power spectrum.

초 이후 AE 발생을이나 신호의 진폭 변화가 일정한 주기로 똑같은 과정을 반복하고 있음으로부터 알 수 있다. 이러한 반복과정에서 발생한 매우 비슷한 신호들의 집단이므로 Fig. 14에서 지속시간 120 μs 이내, 신호진폭 36~67 dB 이내에 집중적으로 분포하게 되는 것이다. Fig. 16에는 이러한 신호들의 대표적인 파형과 주파수 스펙트럼을 나타내었는데 Fig. 15에서의 결과와는 달리 대부분의 신호 에너지가 150~650 kHz 성분에 집중되어 있음을 알 수 있다.

그러나 고속 Fourier 변환(FFT)에 의해 구한 주파수(혹은 파워) 스펙트럼의 이와 같은 차이는 미세 파괴 과정이나 AE 발생원과 결부시켜 정량화하기에는 아직은 다소 미흡하며 앞으로 더 연구해야 할 과제로 생각한다. 왜냐하면 주파수 스펙트럼에 영향을 미치는 실험조건이 너무 다양한 때문이며, 이를 확실하게 제어한 상태에서 획득한 데이터로부터 비로소 정량적인 정보를 얻을 수 있기 때문이다.

센서 특성과 미세파괴 과정의 종합적 고찰. FBG 센서는 전자기장이나 응력장 등 외부 환경에 의한 영향을 받지 않는 점에서 복합재료에서의 미세파괴기구

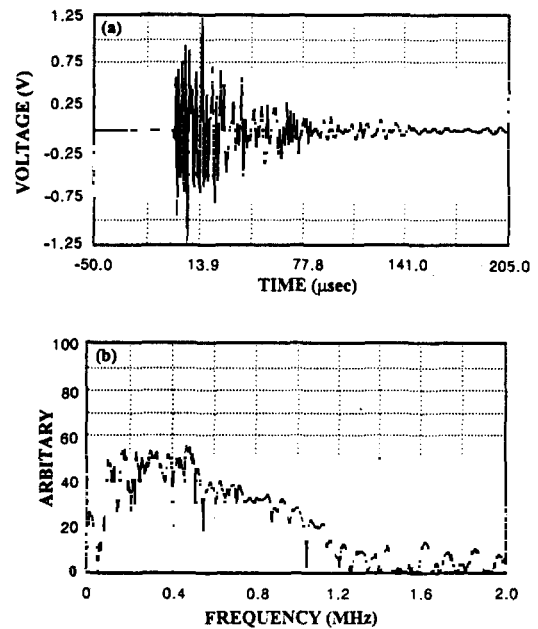


Figure 16. An AE signal acquired during the second period of tensile test at 342.16 seconds: (a) waveform and (b) power spectrum.

의 규명에 매우 적합할 것으로 예상하였으나, 압전 AE센서는 물론 strain gauge에 비하여도 감도가 매우 떨어지며(약 $4 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\text{E}$), 데이터 획득속도가 너무 느리고 작동범위 또한 1533.5~1536 nm로 매우 좁아서 비교적 변형량이 적은 피로파괴의 과정이나 취성재료의 변형에만 제한적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

보다 전통적으로 사용되어온 AE센서는 감도 면에서는 역시 다른 어떤 탐지방법보다 우수하지만 측정 데이터가 갖가지 잡음으로 오염되었을 가능성이 항상 존재하고, 데이터의 정량적 분석이 매우 어렵다는 단점이 있다. 예를들어 255초 부근에서 탐지된 97 dB의 진폭을 갖는 신호는 strain gauge 접촉이 파손되면서 발생한 것으로, 그리고 이를 전후하여 246.2초와 262.7초 부근에서 발생한 각각 83 dB의 진폭을 갖는 신호들은 137 μm의 SiC 섬유가 파단되면서 발생한 것으로 비교적 명확하게 분석될 수 있지만, 13.6 μm의 SiC 섬유가 무수히 많이 파단되면서 발생하였을 것이 분명한 신호집단은 그저 70 dB부근의 진폭을 가졌을 것으로 추정할 수 있을 뿐 실제로

는 다른 발생기구, 예를들어, 섬유-기지 계면의 분리
에 의한 AE 신호와 구별하기 어렵다. 이렇게 외형상
비슷하나 서로 다른 발생원에서 유래된 신호를 분류
하기 위한 방법으로 연구되는 것으로는 pattern rec-
ognition 또는 neural network 기법이 있다.

결 론

- 광섬유 (FBG) 센서와 AE 센서, 그리고 strain
gauge를 이용하여 단섬유 복합재료 (SFC) 시편의
미세 파괴기구를 규명할 수 있었다.

- 광섬유 (FBG) 센서는 압전 AE 센서보다 감도가
다소 떨어지지만 시편에 센서를 직접 매몰할 수 있
고, 주위 환경에 영향받지 않는다는 장점이 있다.

- Fragmentation 시험법에 의한 계면전단강도는
Weibull 분포를 사용하는 통계적 처리를 통하여 신뢰
도를 높일 수 있음을 밝혔으며, 본 연구에 사용된
SiC ($d=13.6 \mu m$) 섬유/에폭시 복합재료에서는 약
26.8 MPa이었다.

- AE 측정과 데이터의 분석에 의해 굵은 SiC 섬
유의 파단처럼 특징적인 현상에 대한 정량적인 평가
가 가능하였으나, 일반적으로는 미세 파괴 기구에 대
한 정성적인 평가만이 가능하였다.

- Bragg 격자를 내장한 광섬유 (FBG) 센서의 감
도가 매우 작으므로 이를 가장 효율적으로 활용할 수
있는 예로는 소성변형의 크기가 작고 변형이 동적이
며 환경 잡음이 높은 피로파괴나 경화시의 미세변화
등을 들 수 있다.

감사의 글: 본 과제는 1996년도 한국학술진흥재단
으로부터 자유공모과제의 지원을 받아 수행되었습니
다.

참 고 문 헌

1. D. Rouby, *J. Acoustic Emission*, **9**(2), 117 (1990).
2. W. J. Park, K. S. Suh, C. Y. Kang and J. W. Park, *Polymer(Korea)*, **19**(4), 521 (1995).
3. K. S. Suh, H. J. Lee, J. H. Park and K. J. Ahn, *Polymer(Korea)*, **18**(4), 568 (1994).
4. S. De Bondt, L. Froyen, L. Delaey and A. Deruyttere, *J. Acoustic Emission*, **11**(3), 95 (1993).
5. L. S. Penn and S. M. Lee, *Fiber Sci. Technol.*, **17**, 9 (1982).
6. M. R. Piggot and D. Andison, *1st Tech. Conf. of Amer. Soc. for Composites*, Dayton, OH, 227 (1986).
7. V. Rao and L. T. Drzal, *Polymer Composites*, **12**(1), 48 (1991).
8. R. V. Subramanian, A. R. Sanadi and A. Crasto, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **4**, 829 (1990).
9. A. N. Netravali, R. B. Henstenburg, S. L. Phoenix and P. Schwartz, *Polymer Composites*, **10**(4), 226 (1986).
10. D. H. Grande, J. F. Mandell and C. C. Hong, *J. Materials Science*, **23**, 311 (1988).
11. J. M. Park, J. H. Lee and D. J. Yoon, *Proceedings of the 10th International Conf. on Composite Materials (ICCM-10)*, VI, 573 (1995).
12. A. Kelly and W. R. Tyson, *J. Mech. Phys. Solids*, **13**, 329 (1965).
13. L. T. Drzal, M. J. Rich, M. K. Koenig and P. F. Lloyd, *J. Adhesion*, **16**, 133 (1983).
14. S. H. Own, Ph.D. Thesis, Washington State University (1984).
15. A. N. Netravali, R. B. Henstenburg, S. L. Phoenix and P. Schwartz, *Polymer Composites*, **10**(4), 226 (1989).
16. S. M. Melle, K. Liu and R. M. Measures, *Applied Optics*, **32**(19), 3601 (1993).