

전기증착된 탄소섬유/에폭시 복합재료의 인장/압축 하중하에서의 전기저항 측정법을 이용한 경화 및 계면특성

박종만[†] · 이상일 · 김진원

Curing Behavior and Interfacial Properties of Electrodeposited Carbon Fiber/Epoxy Composites by Electrical Resistivity Measurement under Tensile/Compressive Tests

Joung-Man Park[†], Sang-Il Lee, and Jin-Won Kim

요약

전기저항 측정법과 인장 및 압축 시험을 이용하여, 탄소섬유/에폭시 복합재료의 경화특성과 계면물성을 평가하였다. 계면이 존재하지 않는 탄소섬유 자체만을 사용했을 경우에는 경화 초기와 최종단계의 저항차이는 없었으며, 계면이 존재하는 탄소섬유/에폭시 시편의 경우에는 매트릭스 경화 수축에 의해 저항차가 크게 나타났다. 인장 하중하의 저항 변화 측정에서, 전기증착된 시편은 섬유의 첫 파단에 의해 저항이 무한대로 도달하는 시간이 미처리에 비해 다소 지연되는 현상을 보였다. 인장 및 압축 시험에서 표면처리된 시편은 미처리섬유에 비해 계면전단 강도가 현저히 크게 증가하였다. 인장의 경우, 미처리섬유에서는 debonding 형태, 그리고 표면처리된 섬유에서는 cone 형태의 파단이 관찰되었다. 압축에서는 부러진 섬유 끝에서 대각선으로 미끄러지는 파단 현상이 두 경우 모두에서 나타났는데, 미처리섬유는 창 끝과 같은 예리한 파단이 일어나며, 전기증착된 섬유는 다소 둔한 파단이 나타났다. 이를 통해 전기증착에 의한 표면처리가 계면접착력과 미세파괴구조에 인장 및 압축하에서 각각 다른 영향을 주는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

Curing behavior and interfacial properties were evaluated using electrical resistance measurement and tensile/compressive fragmentation test. Electrical resistivity difference (ΔR) during curing process was not observed in a bare carbon fiber. On the other hand, ΔR appeared due to the matrix contraction in single-carbon fiber/epoxy composite. Logarithmic electrical resistivity of the untreated single-carbon fiber composite increased

• 2000년 10월 23일 접수(received on October 23, 2000), 2000년 11월 17일 채택(accepted on November 17, 2000)

• 경상대학교 응용화학공학부/고분자공학전공, 항공기부품기술연구센터

(Department of Polymer Science & Engineering, Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea).

[†] 주저자(Corresponding author): e-mail; impark@nongae.gsnu.ac.kr

suddenly to the infinity when the fiber fracture occurred under tensile loading, whereas that of the ED composite reached relatively broadly up to the infinity. Comparing to the untreated case, interfacial shear strength (IFSS) of the ED treated composite increased significantly in both tensile fragmentation and compressive Broutman test. Microfailure modes of the untreated and the ED treated fiber composite showed the debonding and the cone shapes in tensile test, respectively. For compressive test, fractures of diagonal slippage were observed in both untreated and the ED treated composite. Sharp-end shape fractures exhibited in the untreated composite, whereas relatively dull fractures showed in the ED treated composite. It is proved that ED treatments affected differently on the interfacial adhesion and microfailure mechanism under tensile/compressive tests.

KEYWORDS: ELECTRODEPOSITION (ED), ELECTRICAL RESISTIVITY, TENSILE FRAGMENTATION TEST, COMPRESSIVE BROUTMAN TEST, MICROFAILURE MODE

1. 서 론

섬유강화 복합재료에서 섬유/기지 계면접착력은 기계적 물성을 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 특히 탄소섬유와 에폭시 복합재료에서 탄소섬유는 표면에 관능기가 거의 존재하지 않기 때문에 탄소섬유와 기지 사이의 계면접착력을 증가시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 계면접착력을 향상시키기 위한 방법에는 섬유 표면을 산화하는 방법^[1], 플라즈마 처리법^[2], 그리고 상압적인 커플링제^[3]를 이용하는 방법 등이 있다. 섬유의 표면처리법 중에서 전기증착법 (electrodeposition, ED)은 단량체 또는 고분자 형태의 커플링제를 물이나 적절한 용매에 녹여서, 콜로이드 이온형태로 분산시켜 전도성 표면에 필름 형태로 증착시키는 방법이다.^[4] 이 방법은 전도성을 갖는 소재에만 적용할 수 있는 방법으로 재료 선정에 한계는 있으나, 계면접착력 향상의 효과가 아주 우수한 것으로 알려져 있다. 탄소섬유는 복합재료에 널리 이용되는 보강섬유 중에서 흔히 않게 전도성을 띠는 섬유로서, 전기증착법의 적용이 용이하다. 즉, 최적의 표면처리과정을 통하여 균일한 두께와 적절한 조성을 갖는 코팅층을 섬유 표면에 증착시켜, 계면물성을 향상을 유도할 수 있다.

최근, 몇몇 학자들이 복합재료의 경화거동과 미세 파괴구조를 포함한 계면물성을 평가하기 위해 전기적 방법을 많이 도입하고 있다. Electro-micromechanical 시험법은 전도성 섬유강화 복합재료의 전기저항의 변화를 조사하는 방법으로, 탄소섬유와 같은 전도성 섬

유 자체가 센서 역할을 하기 때문에 경화특성과 계면 물성의 평가에 대한 새로운 비파괴 검사로서 보고되고 있다.^[5] Yuse^[6]는 인장과 피로 하중하에서의 탄소섬유 적층판의 전기저항 측정을 통해, 저항 변화와 섬유 파단과 층간분리와의 상관 관계에 대해 연구하였다. 또한, Chung^[7,8]은 탄소섬유 또는 steel 섬유/시멘트 복합재료의 접촉저항도(contact resistivity)를 측정하여, 계면접착력과 전기적인 물성을 상호 비교하였다.

섬유와 매트릭스 사이의 계면물성을 평가하기 위한 방법은 크게 인장 시험과 압축 시험으로 나눌 수 있는데, 인장 시험에는 일반적으로 널리 사용되고 있는 단섬유 pull-out 시험법과 single-fiber composite(SFC) test가 있다.^[9,10] 단섬유 pull-out 시험법은 재료선정에 제약이 없다는 장점이 있고, SFC 시험법은 풍부한 계면정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 압축 시험에는 indenter로 복합재료 시편에 함침된 섬유의 단면을 압축하여, 계면물성을 평가하는 microrindentation 시험법^[11]이 있고, 최근에 시도되고 있는 단섬유 압축 Broutman 파단 시험법이 있다. 이 방법은 시편에 섬유방향의 압축력을 가하여, 섬유 축과 수직인 방향에 인장 응력을 유도하여, 그때 발생하는 섬유 파단과 계면 현상을 조사하여, 섬유와 기지 사이의 계면물성을 평가하는 시험법이다. 또한 이 방법은 인장 파단 시험에서 볼 수 없었던 독특한 형태의 압축에 의한 계면 파괴 현상과 buckling 거동을 조사할 수 있다는 것이 가장 큰 특징이다.^[12-15]

본 연구에서는 미처리와 전기증착된 탄소섬유/에폭

시 복합재료를 이용하여, 경화과정 중의 전기저항과 인장 하중하에서 응답하는 전기저항 변화를 측정하여 표면처리에 따른 계면물성과 비교하였으며, 인장 및 압축 파단 시험을 통해, 계면전단강도와 계면에서의 미세 파괴 형태를 조사하여, 상호 비교하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에 사용된 섬유로는 태광산업에서 제공받은 평균 직경이 7.9 μm 인 탄소섬유(TZ-307)를 사용하였다. Table 1에 전도성을 갖는 탄소섬유의 전기적 물성과 기계적 특성을 나타내었는데, 전기저항은 32mm의 접점간 거리(voltage contacts)에서, 그리고 기계적 특성은 20mm의 gauge length에서 측정되었다. 매트릭스로는 국도화학에서 제공받은 diglycidyl ether of bisphenol-A(DGEBA) 계통의 에폭시 수지(YD-128)를 사용하였고, 경화제로는 미국 Huntzman Petrochemical사의 polyoxypropylene diamine계의 Jeffamine D400과 D2000을 사용하였는데, 본 실험에 적합한 유연성을 부여하기 위해 경화제 D400과 D2000을 적절히 혼합하여 사용하였다. 계면접착력을 향상을 위해 미국 Polyscience사에서 구입한 전기증착용 고분자 커플링제인 Polybutadiene-maleic anhydride(PBMA)를 사용하였다. PBMA의 평균 분자량은

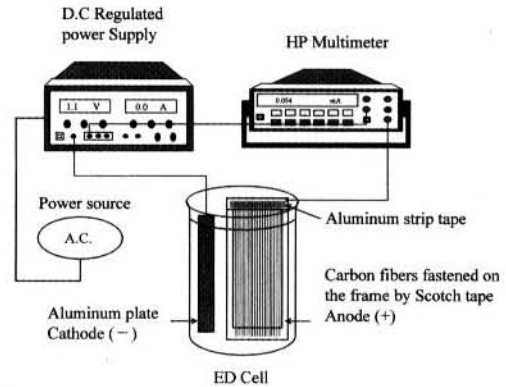


Figure 1. Schematic illustration of ED system for carbon fiber surface treatment.

약 10,000-15,000 정도이며, 화학구조식은 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 전기증착법에 의한 탄소섬유의 표면처리

계면접착력을 향상시키기 위해 사용한 전기증착법의 개략도를 Figure 1에 도시하였다. 50개의 미처리 탄소섬유를 아크릴 프레임에 적당한 간격으로 고정시키고, 한쪽 끝부분을 silver paste를 이용하여, 모든 섬유의 전기적 접촉을 유도하였다. 탈이온화된 2차 증류수에

Table 1. Intrinsically electrical and mechanical properties of carbon fiber

Fiber	Diameter (μm)	Electrical Resistance (Ω)	Electrical Resistivity ¹⁾ ($\Omega\cdot\text{cm}$) $\times 10^{-4}$	Elastic Modulus (Gpa)	Elongation (%)
Carbon	7.9	1.19×10^{-4}	18.9(0.9) ²⁾	245	1.8

1) Measured at 32mm in voltage contacts

2) Standard deviation (SD)

Table 2. Chemical structure of coupling agent

Chemical Name	Chemical Structure
Polybutadiene maleic anhydride (PBMA) ¹⁾	

1) Purchased from Polyscience Inc., U. S. A.

PBMA 0.5wt%를 녹인 후, 이 수용액에 탄소섬유 프레이밍과 적절한 크기의 알루미늄 함께 담근 다음, power supply와 전기적으로 연결하였는데, 이때, 탄소섬유는 anode로 알루미늄판을 cathode로 작용하게 하였다. 약 3.0volts의 전기를 공급하면서, 약 10분간 전기증착을 수행하였다. 전기증착 처리 후에는 어떠한 열처리도 가하지 않고 상온에서 건조하였는데, 이는 탄소섬유 표면에 증착되어 활성화된 고분자층의 열분해나, 자체중합 반응을 배제시키기 위해서이다.

2.2.2 시편 형태 및 제조

Figure 2는 본 연구에 사용된 시편을 나타내었다. Figure 2 (a)는 단섬유 강화 에폭시 복합재료의 경화하는 동안에 발생하는 경화거동을 확인하기 위해 전기저항을 측정하기 위한 시편이다. 테프론 이형필름 위에 한 개의 탄소섬유를 고정하고, 구리선을 이용하여

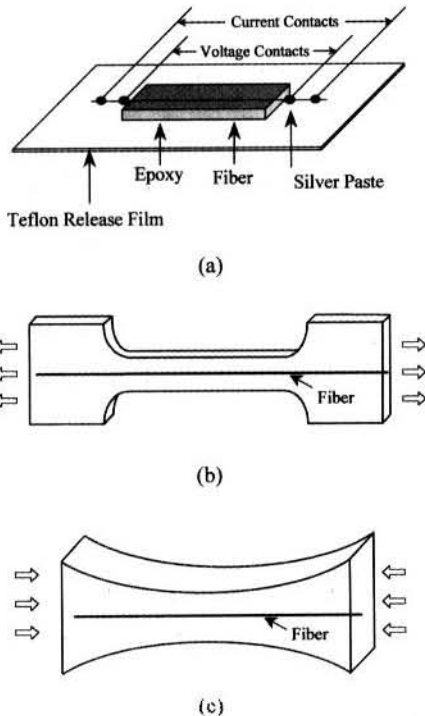


Figure 2. Three-type testing SFC composites for (a) electrical curing monitoring, (b) tensile, and (c) compressive fragmentation tests.

4개의 전기 접점을 형성시켰다. 경화제와 혼합된 에폭시를 부은 후 오븐 내에서 경화하면서 전기저항 변화를 측정하였다. Figure 2 (b)와 (c)는 인장과 압축하에서 탄소섬유/에폭시 복합재료의 섬유 표면처리에 따른 계면물성과 미세파괴거동을 측정하기 위한 시편이다. 인장시편의 치수는 gauge length가 25mm, 폭이 5mm, 시편 두께가 2mm 이고, 압축시편은 gauge length가 30mm, 시편 중심부의 폭과 두께가 모두 6.3mm이다.

2.2.3 전기저항의 측정

본 연구에서 탄소섬유/에폭시 복합재료의 전기저항은 HP34401A 디지털 멀티미터를 이용하여 측정하였다. 경화 중의 시편 내부에서 발생하는 전지저항의 변화를 측정하기 위해, 실제 복합재료의 경화 사이클과 동일하게 하여, 경화과정 전체를 조사하였다. 경화 사이클은 80°C에서 1시간 동안 전경화하였고, 120°C에서 1시간 동안 후경화한 후, 6시간 동안 자연 냉각하였다. 단섬유 시편의 인장 하중하에서의 탄소섬유 파단에 따른 저항 측정에서, 10 kN의 로드셀이 장착된 만능시험기(UTM)에 시편을 장착한 후, 디지털 멀티미터와 전기적으로 연결을 한 다음, 분당 0.5mm의 속도로 인장을 가하면서, 동시에 내부 저항 변화를 측정하였다.

전기저항도(electrical resistivity)은 측정된 전기저항 값으로부터 구했는데, 그 관계식은 다음과 같다.

$$\rho = \left(\frac{A}{L_{ec}} \right) \times R \quad (1)$$

여기서, A 는 탄소섬유의 단면적이고, L_{ec} 는 전압점간 거리(voltage contacts)이며, R 은 측정된 저항 값이다. 본 연구에서는 Figure 2 (a)에 나타난 것과 같이 4-point probe법을 이용하여 전기저항을 측정하였다. 구리선과의 전기적인 접촉이 용이하도록 하기 위해 silver paste를 이용하여 접촉 A, B, C 그리고 D를 형성하였다. 실제 전기저항이 측정되는 구간은 점 B와 C 사이로서, 전압점간 거리라 하며, A와 D 구간을 전류점간 거리(current contacts)라 한다.

2.2.4 계면전단강도 측정

인장 및 압축 파단 시험을 통한 계면전단강도를 평

가하기 위해 UTM 사용하였다. 측정 시편을 UTM에 장착한 후, 인장의 경우는 분당 0.5mm, 압축의 경우는 분당 2mm의 속도로 하중을 가하였다. 섬유유 의 파단 개수가 더 이상 증가하지 않을 때까지 하중을 가한 후, 편광현미경으로 섬유유 의 파단 길이와 미세파괴구조를 측정하였다.

인장 및 압축 계면전단강도(τ_t 및 τ_c)를 구하기 위해 아래에 나타낸 Kelly-Tyson 식을 사용하였다.

$$\tau_t = \frac{\sigma_{f,ut} \cdot d}{2l_c} \quad (2)$$

$$\tau_c = \frac{\sigma_{f,uc} \cdot d}{2l} \quad (3)$$

여기서 l_c 는 인장 시험에 의한 임계 파단 길이이고, l 은 압축시험에 의한 파단이 일어난 전체의 길이이며, $\sigma_{f,ut}$ 와 $\sigma_{f,uc}$ 는 각각 섬유유 의 인장 및 압축강도이고, d 는 섬유유 의 직경이다. 임계 파단 길이에서 섬유유 강도를 직접적으로 측정하기 어렵기 때문에, Weibull weakest link rule을 이용하여, 측정 가능한 gauge length에서 얻은 강도 값으로부터 임계 파단 길이에서의 섬유유 강도를 구하였다.

$$\sigma_f = \sigma_0 \cdot \left(\frac{l_c}{l_0}\right)^{-\frac{1}{\rho}} \quad (4)$$

여기서, σ_0 는 측정 가능한 gauge length에서의 섬유유 강도이며, ρ 는 섬유유 인장강도 측정에 대한 Weibull distribution에서의 shape parameter이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미처리와 처리된 탄소섬유유 의 기계적 물성

Table 3은 미처리와 ED 처리된 탄소섬유유 의 인장 및 압축 시험에 의한 기계적 물성을 나타내고 있다. 처리된 탄소섬유유 는 미처리섬유유 에 비해 인장강도가 현저히 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 단단하고 균일하게 코팅된 고분자층이 탄소섬유유 의 표면 결합을 지지하기 때문에 미처리에 비해 응력집중점을 분산시킨 것으로 사려된다. 섬유유 의 압축강도 측정은 매우 어려운 문제로써, 표준화된 실험 방법이 없다. 섬유유 를 수지에 함침

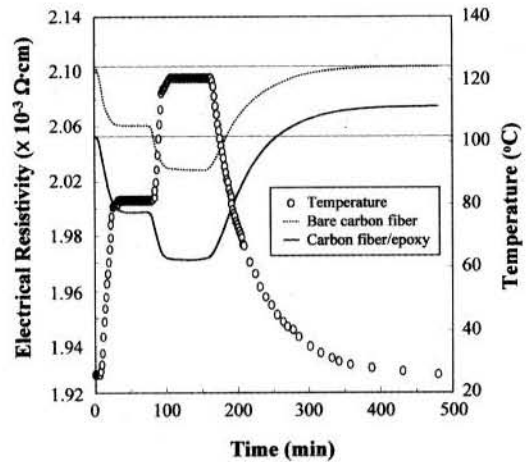


Figure 3. Electrical resistivity monitoring during curing process for bare single-carbon fiber and single-carbon fiber/epoxy composite.

Table 3. Comparison of fiber strength between the untreated and ED treated carbon fiber by tensile and compressive test

Types	No. of Specimen (EA)	Diameter (μm)	Scale Parameter (α)	Shape Parameter (β)	Tensile Strength (MPa) ¹⁾	Compressive Strength (MPa) ²⁾
Untreated	49	7.9(0.1) ³⁾	3971	5.44	3664(716)	2432
ED	44	8.9(0.3)	4488	5.31	4458(721)	2960

1) Gauge length of specimens: 2mm

2) Calculated from Ref. (13)

3) Standard deviation (SD)

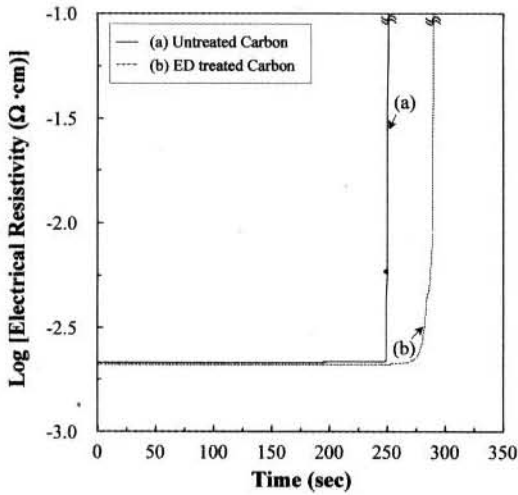


Figure 4. Comparison of logarithmic electrical resistivity depending on the surface treatment in a SFC: (a) the untreated; (b) ED treated.

하여 상대적인 섬유강도를 측정하는 방법과 상온(in-air) 상태에서 측정하는 방법 등이 알려져 있다. 수지에 함침한 경우는 섬유와 매트릭스의 물성과 계면 상태, 그리고 시편의 형태에 따라 달라질 수 있다. Oshawa^[15]는 인장과 압축의 계면전단강도가 같다는 가정하에서 압축강도는 인장강도의 약 절반에 해당된다고 하였다. Wood^[13]는 modulus가 260GPa인 탄소섬유의 경우, 압축강도는 인장강도의 66.4%에 해당한다고 하였다. 본 연구에서의 압축강도는 modulus가 245GPa인 탄소섬유를 Wood의 방법으로부터 계산하였다.

3.2 표면처리에 따른 탄소섬유의 저항 변화

Figure 3은 경화하는 동안에 발생하는 탄소섬유와 탄소섬유/에폭시 복합재료의 온도에 대한 전기저항도 변화를 비교 도시한 것이다. 탄소섬유는 일반적인

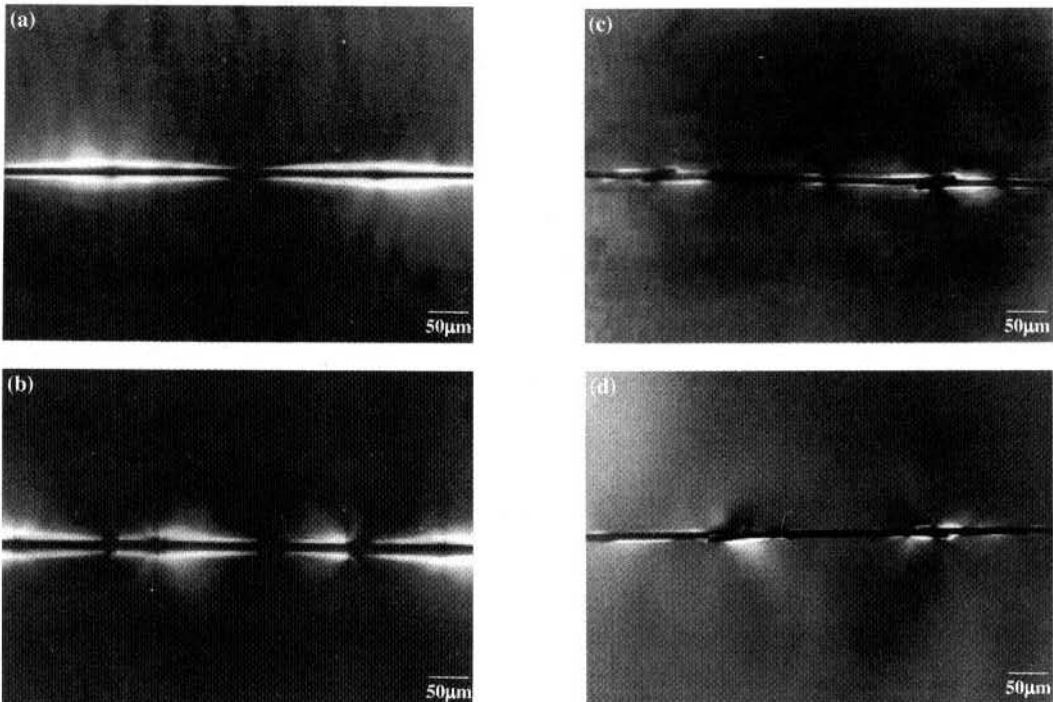


Figure 5. Typical fracture modes of single-carbon fiber composites depending on the surface treatment: (a) the untreated and (b) ED treated specimen under tensile loading; (c) the untreated and (d) ED treated specimen under compressive loading.

금속재료와 달리 온도가 증가할수록 전기저항도가 감소하는 경향을 보였는데, 이것은 탄소섬유의 상이한 열팽창 거동과 미세구조(micro-structure)에 기인한 현상으로 고려된다. 탄소섬유는 섬유 축 방향과 수직방향의 구조가 다른 전형적인 이방성 재료이며, 또한, 많은 빈 공간(voids)이 존재하는 micro-fibril 구조를 가지고 있다. 이러한 구조적 특징에 의해, 일반적으로 섬유 축 방향의 열팽창계수는 감소의 값을 갖고, 반면에, 수직 방향(섬유의 직경 방향)은 증가의 값을 갖는다. 즉, 온도가 증가함에 따라 섬유축 방향에서는 수축이 일어나고, 섬유 직경 방향으로로는 팽창이 일어나는데, 이러한 기하학적인 형상비의 감소에 의해 전기저항도가 감소한 것으로 생각된다. 또한, 섬유의 직경 방향으로 열 팽창이 발생한다는 것은 빈 공간이 감소하고, 서로 다른 micro-fibril들간의 전기적 접촉 확률이 증가하기 때문에 온도 증가에 따른 전체적인 전기저항도가 감소한 것으로 사려된다.

탄소섬유만의 경우, 경화하는 동안에 초기단계와 최종단계의 저항차가 거의 없다. 이것은 경화 중의 열이력에 대해 섬유의 구조적 변화나 물성 변화 없이 완전하게 회복한다는 것을 의미하며, 탄소섬유가 열적 변화에 대해 민감하게 응답한다는 것을 확인할 수 있었다. 탄소섬유/에폭시 복합재료의 경우는 초기단계의 저항보다 최종단계의 저항이 더 증가함을 알 수 있는데, 이것은 섬유와 매트릭스 사이에 존재하는 계면으로 인해 생기는 현상으로 매트릭스의 열 수축에 의해 계면에서 발생하는 내부 응력의 변화로 인해 생긴 현상으로 생각된다.

Figure 4는 미처리 및 전기증착된 탄소섬유/에폭시 복합재료의 인장 시험 후, 섬유 첫 파단에 의해 나타나는 전기저항도 변화를 도시한 그림이다. 미처리의 경

우, 섬유의 첫 파단이 일찍 나타났으며, 섬유 파단이 발생함과 동시에 저항도가 갑자기 무한대로 증가하였다. 반면에, 전기증착된 탄소섬유의 경우는 섬유의 첫 파단이 미처리보다 다소 늦게 나타났으며, 섬유 파단에 의해 저항도가 무한대로 도달하는 시간이 다소 지연되는 현상을 보였다. 외부 변형에 의한 인장 응력이 매트릭스에서 섬유로 전달될 때, 향상된 계면접착력이 탄소섬유와 매트릭스를 강력하게 결합시키기 때문에 파단 시간을 다소 지연된 것으로 사려된다.

3.3 인장 및 압축에 의한 미세파괴 형태

Figure 5는 인장과 압축 시험에 의한 미처리와 전기증착된 탄소섬유의 미세파괴 형태를 비교한 그림이다. 인장 시험에서 미처리의 경우에는 debonding에 의한 파단이 발생하였고, 반면에 표면처리한 경우에는 cone 형태의 파단이 관찰되었다. 이것은 관능기의 도입에 의한 탄소섬유와 에폭시 계면의 접착력이 증가하였기 때문에 파단 형태의 차이를 가져온 것으로 생각된다. 압축 시험에서 미처리와 처리 두 경우 모두에서 대각선으로 미끄러지는 듯한 파괴가 발생하였는데, 특히, 미처리의 경우에는 파단 섬유의 끝이 예리한 창 끝과 같은 형태를 나타내었고, 표면처리된 경우에는 파단 면이 다소 둔한 형태를 보여주었다. 이것 또한 전기증착법에 의해 계면접착력의 향상에 기인한 현상이며, 섬유 표면에 흡착된 고분자층이 취성 거동을 갖는 섬유파괴현상을 다소 둔화시킨 것으로 생각된다.

Table 4. Comparison of aspect ratio and IFSS for the untreated and ED treated composites using tensile/compressive fragmentation test

Type		Aspect Ratio (l_c/d)	Fiber Strength (MPa) ¹⁾	IFSS	Improvement (%)
Tensile	Untreated	71.6	5031	35.1	-
	ED	59.7	6575	55.1	57.0
Compressive	Untreated	35.8	3328	1.29	-
	ED	24.3	4469	1.99	54.2

1) Fiber Strength at critical fragmentation length, l_c by weakest link rule

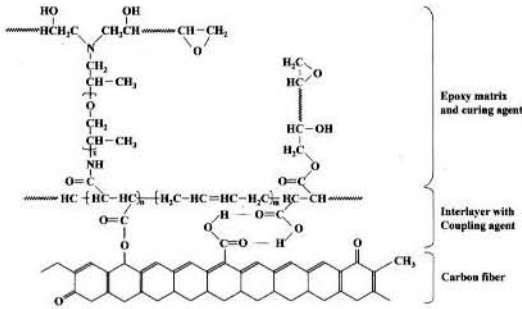


Figure 6. Possible illustrations for chemical reaction among carbon fiber surface, polymeric PBMA coupling agent and epoxy matrix.

3.4 계면전단강도 비교

Table 4는 인장 및 압축 시험에서 미처리와 전기증착된 경우의 계면전단강도와 aspect ratio를 비교한 것이다. 두 시험법 모두에서 표면처리한 경우가 미처리한 경우보다 계면전단강도가 훨씬 증가한 것을 확인할 수 있었다. Figure 6은 전기증착된 탄소섬유와 PBMA 커플링제, 그리고 에폭시 매트릭스 사이에 발생할 수 있는 화학적 결합을 도시한 것이다. 탄소섬유-PBMA 증착층과 PBMA 증착층-에폭시 매트릭스의 두 계면 사이에 수소결합 또는 화학결합이 계면전단강도 증가에 영향을 준 것으로 예상된다.

Figure 7에서는 미처리와 표면처리한 경우의 인장 및 압축 계면전단강도를 함께 도시하였는데, 인장 계

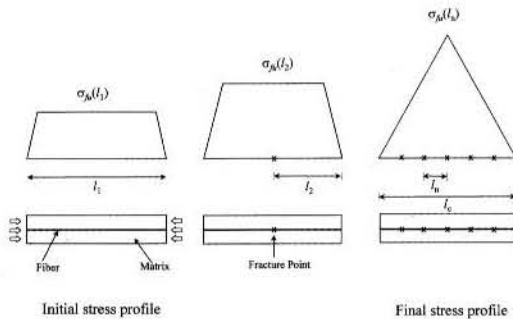


Figure 8. Schematic profile of fiber strength in compressive fragmentation process.

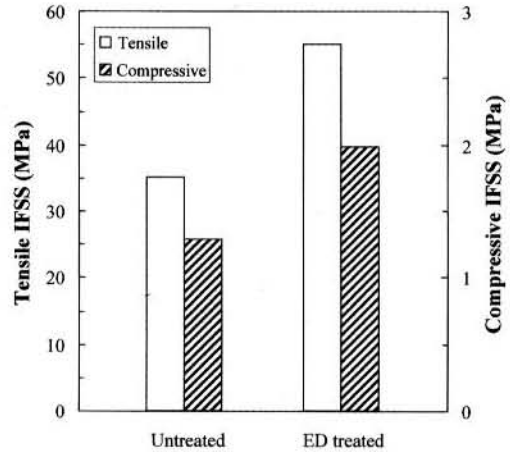


Figure 7. Comparison of IFSS between the untreated and ED treated composites using tensile and compressive fragmentation tests.

면전단강도가 압축 계면전단강도보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 Wood^[13]에 따르면, 압축강도가 인장강도에 비해 적었으며, 인장 및 압축 파단 시험에서 파괴 메커니즘을 다르게 해석했다. 인장 시험에서는 파단된 섬유들은 불연속적이며, 이 파단 섬유에 걸리는 응력은 거의 존재하지 않는다. 따라서, 계면전단강도는 섬유의 임계 파단 길이로부터 측정하였기 때문에 값이 크다.

Figure 8은 압축 하중하에서 응력 변화를 도시한 것으로, 압축 시험에서는 섬유에 파단이 발생했다라도, 파단 섬유에는 normal stress가 존재한다. 즉, 압축 응력에 의해 파단된 섬유는 파단면이 접촉을 계속 유지하고 있기 때문에 파단 섬유에 걸리는 하중이 이웃하는 파단 섬유에 전달되며, 전체적으로는 섬유에 걸리는 응력은 파단 길이와 관계없이 일정하게 된다. 따라서, 압축 하중하에서 계면전단강도는 섬유의 임계 파단 길이와 무관하게, 섬유 파단 전체길이로부터 구하며, 이러한 결과로 인해, 압축 계면전단강도는 인장 계면전단강도에 비해 낮은 값을 보여 주고 있다.

또한, 인장 및 압축 하중에 의한 섬유와 매트릭스 사이의 응력 전달 메커니즘의 차이를 살펴보면, 인장 하중하에서는 섬유축 방향으로 인장 응력이 작용하고, 압축 하중하에서는 축 방향에 대해 수직 방향의 인장

응력이 작용한다. 이러한 응력 전달 메커니즘의 차이가 인장 및 압축 시험간의 계면접착력에 많은 영향을 주었을 것으로 생각된다.

4. 결론

전기증착된 탄소섬유/에폭시 복합재료의 전기저항 측정법과 인장 및 압축 시험을 통한 전기적 물성과 계면물성의 상호관련성에 대한 결론은 다음과 같다. 탄소섬유의 이방성의 열팽창 거동과 미세구조에 기인하여, 온도가 증가할수록 전기저항도가 감소하였다. 탄소섬유/에폭시 복합재료는 탄소섬유 자체만을 사용했을 경우보다, 경화 초기와 최종단계의 저항차(ΔR)가 크게 나타났다. 인장 하중하에서, 전기증착된 경우는 섬유의 첫 파단이 다소 지연되는 현상을 보였고, 저항도 변화 곡선이 다소 완만하게 무한대로 증가하였으며, 또한 인장 및 압축 시험을 통한 계면전단강도도 현저히 증가하였다. 인장 시험에서 미처리의 경우 debonding이, 그리고 전기증착의 경우 cone 형태의 파단이 관찰되었다. 압축 시험에서는 대각선으로 미끄러지는 듯한 파괴가 발생하였는데, 특히, 미처리의 경우 파단된 섬유의 끝이 예리한 창 끝과 같은 형태를, 표면 처리된 경우에는 파단 면이 다소 둔한 형태를 보여 주었다. 이것은 계면접착력의 향상에 기인한 현상으로, 섬유 표면에 흡착된 고분자층이 섬유 파괴 현상을 다소 둔화시킨 것으로 고찰된다. 이러한 전기저항 측정을 도입한 시험법은 전도성 섬유강화 복합재료의 경화특성과 계면물성을 평가하기 위한 비파괴 검사에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 지정 경상대학교 항공기부품기술연구센터(ReCAPT)의 재정적 지원을 받아 이루어 졌으므로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. C. M. Baillie, and M. G. Bader, *J. Mater. Sci.*, 29, 3822 (1994).
2. Z. F. Li, A. N. Netravali, and W. Sachse, *J. Mater. Sci.*, 27, 4625 (1992).
3. J. M. Park, J. O. Lee, and T. W. Park, *Polym. Compos.*, 17, 375 (1996).
4. J. O. Iroh, J. P. Bell, D. A. Scola, and J. P. Wesson, *Polymer* 35, 1306 (1994).
5. X. Fu, and D. D. L. Chung, *Compos. Interfaces*, 4, 197 (1998).
6. K. Yuse, and C. Bathias, in Proc. ICCM-12, pp. 767. Paris, France (1999).
7. X. Fu, and D. D. L. Chung, *Cem. Concr. Res.*, 25, 1397 (1995).
8. X. Fu, and D. D. L. Chung, *Cem. Concr. Res.*, 25, 1391 (1995).
9. A. R. Sanadi, and M. R., Piggott, *J. Mater. Sci.* 20, 431 (1985).
10. J. M. Park, W. G. Shin and D. J. Yoon, *Compos. Sci. & Technol.*, 59, 355 (1999).
11. D. B. Marshall and W. C. Oliver, *Mater. Sci. and Eng.*, A126, 95 (1990).
12. C. Ageorges, K. Friedrich, T. Schuller and B. Lauke, *Composites Part A*, 30, 1423 (1999).
13. J. R. Wood, H. D. Wagner and G. Marom, in Proc. R. Soc. Lond. A, 452, p. 235 (1996).
14. H. D. Wagner, C. Migliaresi, A. H. Gilbert, and G. Marom, *J. Mater. Sci.*, 27, 4175 (1992).
15. T. Oshawa, M. Miwa, M. Kawade, and E. Tsutshima, *J. Appl. Polym. Sci.*, 39, 1733 (1990).
16. A. Kelly, and W. R. Tyson, *J. Mech. Phys. Solids*, 13, 329 (1965).
17. J. M. Park, E. M. Chong, D. J. Yoon, and J. H. Lee, *Polym. Compos.*, 19, 747 (1998).
18. K. Goda, J. M. Park, and A. N. Netravali, *J. Mater. Sci.*, 30, 2722 (1995).
19. H. F. Wu, A. N. Netravali, *J. Mater. Sci.*, 27, 3318 (1992).