

論文

전기저항 측정법을 이용한 탄소섬유/기지 간 계면에서의 섬유 미끄러짐 정도 측정방법

권동준*, 왕작가*, 구가영*, 박종만**

Measurement of Electrical Resistance Method in Characterizing the Slip ratio of Carbon fiber/Matrix at the Interface

Dong-Jun Kwon*, Zuo-Jia Wang*, Ga-Young Gu*, Joung-Man Park**

ABSTRACT

The single carbon fiber tensile test was performed with electrical resistance measurement. Tensile property of single carbon fiber which accompanied by the relationship between the electric resistance and the strain was investigated. Since the collected data showed a linear relationship between them, the coefficient of fiber slip ratio (FSR) was obtained by computation. The fragmentation specimen (FS) was tested under tensile loading, and the single carbon fiber broke first due to the stress transferring from matrix to reinforcing fiber. The stress distribution of carbon fiber could be observed via the electrical resistance change. Slipping between carbon fiber and matrix was predicted based on the fragmentation test results, and the FSR was used to evaluate interfacial adhesion comparatively. The large FSR indicated poor interfacial bonding. Work of adhesion between carbon fiber and matrix was measured to verify the FSR method, and two results exhibited a consistent conclusion.

초 록

전기저항 측정법을 이용하여 단일 탄소섬유의 인장 실험을 실시하였다. 탄소섬유의 전도성을 이용하여 인장하중에 따른 신율과 전기저항 변화도간의 관계를 연구하였다. 섬유 인장 과정동안에 일정 신율 거리상 응력과 전기저항 변화율간의 상관관계를 통계적으로 정리하였다. 결과에 대해 추세를 그어 섬유의 변형에 따른 거동 모델을 구성하였다. 프레그먼테이션 시편을 이용하여 인장 실험에 따른 인장 응력이 재료 내부로 전달되면서, 시편 내부 탄소섬유에도 인장 응력이 가해져 기지보다 섬유가 먼저 파괴되었다. 이 경우 탄소섬유의 전기저항 변화도를 측정하여 결과 값을 탄소섬유의 거동 모델에 대입하여 프레그먼테이션 시편 내부에 있었던 탄소섬유의 거동을 분석할 수 있었다. 탄소섬유의 인장 신율을 예측하고 프레그먼테이션 시편의 실제 신율을 비교하여 섬유와 기지 사이에 발생된 섬유 미끄러짐 정도를 확인하였다. 섬유 미끄러짐 정도의 수치가 클 경우, 기지와 섬유 간 계면 상태가 약한 접합의 상태였다. 이러한 결과를 확인하기 위해서 접착일 평가법을 이용하였으며, 두 실험법의 결과, 동일한 경향임을 확인하였다.

Key Words : 단일섬유강화복합재료(single fiber composite), 섬유미끄러짐비율(fiber slip ratio), 전기저항측정법(electrical resistance measurement), 계면 물성 평가(interfacial evaluation), 접착일(work of adhesion)

1. 서론

우주 항공 사업의 확장으로 차량용 부품 소재의 복합재료 응용이 크게 확장이 되고 있는 추세이다[1]. 복합재료를 제품

접수: 2012년 9월 28일, 수정: 2012년 12월 12일, 게재승인: 2012년 12월 13일

* 경상대학교 나노·신소재공학부 대학원

** 대학교 나노·신소재공학부, 공학연구원, Corresponding author(E-mail:jmpark@gnu.ac.kr)

에 적용하기 위해서 중요한 부분은 복합재료의 물성 뿐 아니라 섬유와 기지 간의 계면 물성을 규명하고 강화시키는 것이다. 복합재료의 계면은 해석하기 까다로운 3차원 경계면이 존재한다. 이러한 섬유와 기지간의 계면 물성을 평가하는 방법으로는 미세역학실험법을 이용한 계면전단강도(interfacial shear strength, IFSS) 실험 방법과 거시적인 평가방법으로 층간전단강도(interlaminar shear strength, ILSS) 실험 방법이 존재한다. 이러한 평가 방법들은 계면에 대한 물성 결과를 수치로 확인하는 평가 방법이다[2-5]. 재료적인 차원에서 섬유와 기지간의 상태의 순수한 계면접착력을 확인하기 위해서 여러 실험적 변수를 최소화한 미세 시편을 제조하여 계면 물성을 평가하는 것이 안정적이다[6-8].

미세역학실험법을 이용하여 여러 국 내외 연구실에서 계면 물성을 평가하는 방법으로 계면 상태를 파악하고 있다. 대표적인 미세역학실험 방법으로는 섬유 표면에 마이크로 단위로 물방울 모양의 수지를 함침시킨다. 섬유에 함침된 기지를 아래로 잡아당길 때 발생하는 최대 힘을 계산하여 계면전단강도를 계산하는 마이크로드롭렛 실험법이 있다[9]. 또 다른 방법으로는 기지 재료 내부에 섬유 한 가닥을 함침시켜 시편을 제조하고 재료를 단축으로 인장한다. 기지 재료 내부에 섬유의 파단이 발생된 최소의 섬유길이를 평균화하여 계면전단강도를 계산하는 프로그래밍 평가법 등이 일반적이다[10]. 하지만 이러한 평가방법에는 단점이 존재한다. 마이크로드롭렛의 경우 실험의 경우 통계적으로 계면전단강도 값을 명확히 할 수 있으나, 실험의 단계가 복잡하다는 단점이 있다. 프로그래밍 실험법의 경우는 투명한 기지에서만 내부 섬유를 확인할 수 있기 때문에 기지 선정의 문제가 존재한다.

좀더 평가방법적인 부분의 편의성을 향상시키고자 전기저항 측정법을 이용할 수 있다. 일부분의 비파괴 평가 분야에서는 단방향 프리프레그를 이용한 복합재료의 내부 손상에 대해 전기저항 측정법을 이용한 연구가 발표된 사례가 있다[11-14]. 전도성을 지니는 재료의 변형은 일정한 전기저항 변화도를 나타내기 때문에 이 방법을 이용하여 계면 물성 평가가 간단하게 가능할 수 있도록 실험을 구성하였다. 전기저항 평가법을 이용할 경우 프로그래밍 평가법의 단점인 투명한 기지에서만 실험이 가능했던 조건을, 불투명한 기지에서도 실험이 가능하도록 평가 방법을 새로이 고안해 보았다. 본 연구에서는 탄소섬유의 인장에 따른 전기저항 변화도와 응력간의 상관관계를 규명하였다. 탄소섬유의 인장응력과 전기저항 변화도 간의 관계식을 모델화하였다. 탄소섬유의 거동 모델을 사용하여 프로그래밍 평가법 시편 내부에 존재하는 탄소섬유의 변화를 분석하였다. 프로그래밍 평가법 시편 내부에 존재하는 탄소섬유의 초기 파괴지점에서의 전기저항 변화율을 이용하여 탄소섬유 거동 모델에 적용하였다. 이때 실제 시편이 인장된 신호와 시편 내부의 탄소섬유 인장 신호의 차이가 확인되었다. 이때의 신호 차이를 내부에서의 탄소섬유 미끄럼 정도를 예측하여 계면 물성을 평가하는 척도로 사용하였다. 계산되어 확인한 결과에 대한 신빙성을 확인하기

위해 열역학적 개념을 이용한 접착일을 평가하여 에폭시와 탄소섬유간의 계면 물성에 대해 비교 평가하였다.

2. 실험

2.1 재료

단섬유 강화 복합재료를 제작하기 위해 두 종류의 기지를 사용하였다. 강도가 높은 시편을 제조하기 위해 비스페놀-A 타입의 에폭시(YD-114, (주)국도화학)와 메틸 테트라하이드로 프탈릭 안하이드라이드계 경화제(KBH-1089, (주)국도화학)로 1:1 비율로 제조하였다. 다른 하나의 기지는 비스페놀-F 타입의 에폭시(YDF-175, (주)국도화학)와 폴리아미드계 경화제(G-0331, (주)국도화학)로 7:3 비율로 기지를 경화하였다. 경화제로는 직경이 8 μm 인 탄소섬유(T700S, Toray사, 일본)를 사용하였다.

2.2 탄소섬유 인장 응력과 전기저항 변화도간의 상관 관계 규명

탄소섬유의 인장 응력에 따른 전기저항 변화도 간의 상관 관계를 확인하기 위해 전기저항을 측정하면서 20회의 단섬유 인장실험을 진행하였다. 중요한 부분은 구리선과 탄소섬유와의 접점이다. 구리선과 탄소섬유간의 접촉저항을 줄이기 위해 은 페인트를 문혀 안정적인 전기저항 측정이 가능하도록 하였다. 탄소섬유의 인장에 따른 전기저항 변화도를 밀티미터 (HP34401, Agilent 사, 미국)로 측정하여 일정 신호에 따른 응력과 전기저항에 대한 결과를 엑셀로 정리하였다. 통계적으로 데이터를 정리하여 인장에 따른 전기저항 변화도와 응력과의 관계에 대한 탄소섬유 거동 모델을 구축하였다.

2.3 프로그래밍 평가법을 이용한 탄소섬유와 기지의 계면에서의 미끄럼 정도 평가

Fig. 1와 같이 프로그래밍 평가법 시편 내부에 전기저항 측정을 위해 구리선을 탄소섬유에 접촉시켰다. 시편의 인장에 따른 탄소섬유의 전기저항 변화도를 평가할 수 있도록 시편을 구성하였다. 전기저항 측정 방법을 이용하여, 인장에 따른 시편 내부의 섬유 파단 시 전기저항 측정 결과가 오버로드로 확인된다는 점을 이용하여 최초의 섬유 파단 구간을 확인하였다. 프로그래밍 평가법을 이용한 인장 실험 결과로 전기저항 오버로드가 발생된 초기 구간의 전기저항 변화도($\Delta R/R_0$) 값을 이용하여 탄소섬유 거동 모델식에 측정 결과를 대입하였다. 모델을 이용하여 에폭시와 탄소섬유와의 계면 관계를 예상 할 수 있다. 에폭시 기지 내부에 존재하는 최초의 탄소섬유가 인장 파단 시 받은 응력, 탄소섬유의 시편 내부에서의 신호를 예측 할 수 있다. 실제로 확인되는 프로그래밍 평가법 시편의 신호(ϵ_s)와 탄소섬유 거동 모델을 이용하여 확인한 탄소섬유의 신호(ϵ_f)를 비교하여 섬유 미끄럼 정도(fiber slip ratio, FSR)라는 평가 인자를 계산 할 수 있었다. FSR을 계면 물성

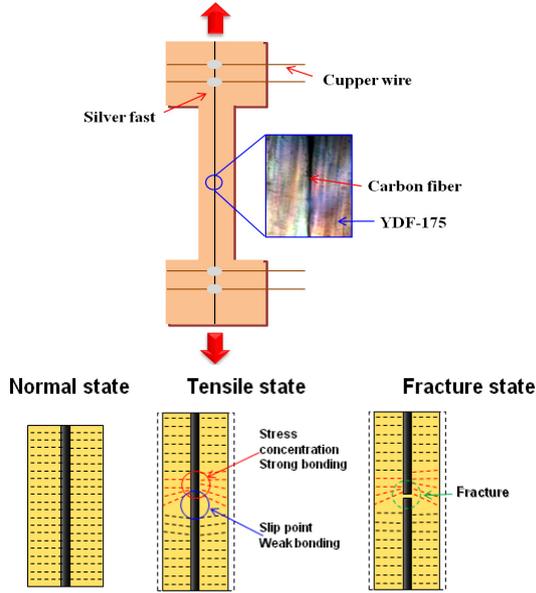


Fig. 1 Specimen of electrical resistance of fragmentation test.

평가의 척도도 이용할 수 있었다. FSR을 측정하는 수식은 아래와 같다.

$$FSR = \epsilon_s - \epsilon_f \tag{1}$$

2.4 젖음성 및 접착일 측정

젖음성 측정방법인 동적 및 정적 접촉각 측정 중에서 본 연구에서는 정적 접촉각으로 측정하였다. 각기 다른 표면에너지를 가진 에폭시 표면에 측정 용매들의 작고 균일한 드롭을 떨어뜨려 액체와 소재 간에 이루어지는 정적인 접촉각은 광학현미경 사진을 이용하여 각을 측정하였다. 사용된 측정 용매로는 이중중류수, 포름아마이드, 에틸렌글리콜, 다이오드매탄 4 가지 용매를 사용하였다. 정적 접촉각은 Young 식 (2)으로 표시된다. 식에서, γ_L 는 액체의 표면장력, γ_{SL} 는 고체/액체간의 계면에너지, 그리고 γ_S 는 고체의 표면에너지이다 [15]. 전체 표면장력, γ^T 은 Lifshits-van der Waals 조성, γ^{LW} 와 산-염기 조성, γ^{AB} 의 합이다. 산-염기 조성 (혹은 수소결합)은 전자받기, γ^+ 와 전자주기, γ^- 조성을 포함한다. 또한, 접착일, W_a 을 나타내는 변형된 Young-Dupre 식은 (3)으로 표시 된다. 고체의 γ_S^{LW} 은 전자받기와 전자주기가 없는 비극성 용액의 접촉각으로부터 구해진다. 극성과 분산표면에너지를 구하기 위해, Owens-Wendt 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta \tag{2}$$

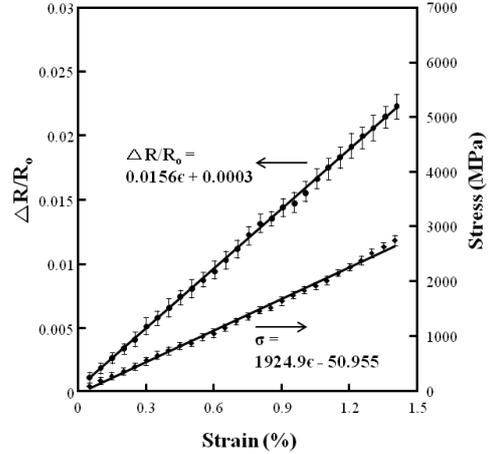


Fig. 2 Linear equation of carbon fiber tension with electrical resistance ratio.

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos \theta) = 2(\gamma_L^{LW} \gamma_S^{LW})^{\frac{1}{2}} + 2 \left[(\gamma_S^- \gamma_L^+)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^+ \gamma_L^-)^{\frac{1}{2}} \right] \tag{3}$$

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos \theta) = 2(\gamma_S^d \gamma_L^d)^{\frac{1}{2}} + 2(\gamma_S^p \gamma_L^p)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

3. 결과 및 토론

3.1 단섬유 인장실험을 통해 확인한 탄소섬유의 인장력과 전기저항 변화도 간의 거동 모델 규명

Fig. 2과 같이 탄소섬유의 인장 결과를 전기저항 변화도와 응력간의 관계를 일정 신율 단위로 정리하여 모델화 과정을 가질 수 있다. 20회의 인장 실험 결과 중 응력과 전기저항 변화도 데이터를 0.05% 신율 간격으로 정리하여 평균화하였다. 탄소섬유는 전도체이며 일정 인장에 의해 재료의 변형이 발생하는 과정이 Kirchhoff's 법칙으로 설명할 수 있다 [16]. 법칙을 설명하는 수식은 다음과 같다.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots E_n \tag{5}$$

수식 (5)에 E는 전체 기전력을 의미하며, 탄소섬유 내부를 임의의 폐회로라 하였을 경우 전체 기전력을 의미한다. E₁, E₂, E₃, ...E_n는 탄소섬유 내부에서의 전압 강하에 따른 기전력 변화가 발생하는 것을 의미한다. 복합재료 내부의 전체 기전력은 저항에 의해 발생된 전압강하의 총합과 같다. 응력을 받아서 변형이 발생되었을 경우 재료 내부의 전체 기전력에 변화가 발생된다. 이때의 변화를 전기저항 변화로 측정할 수 있다. Fig. 2와 같은 경향으로 확인되었다. Fig. 2와 같은 경향을 바탕으로 탄소섬유의 거동을 예측하였다.

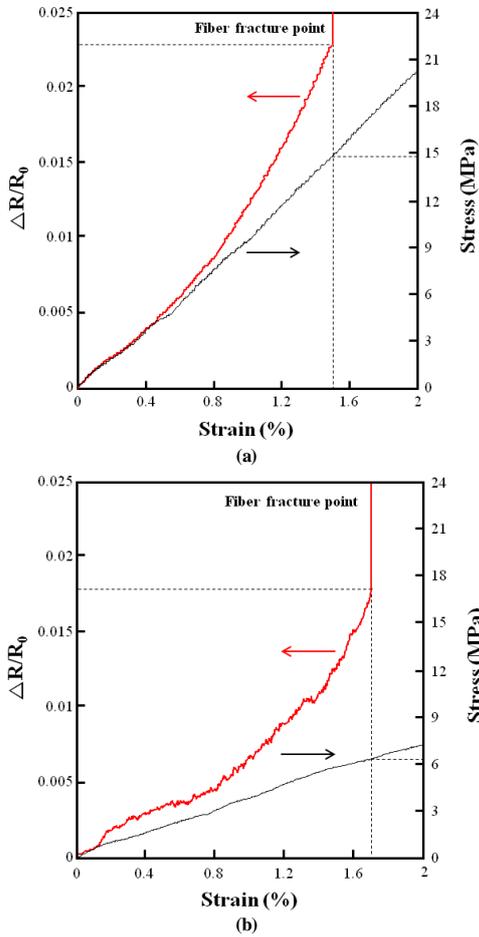


Fig. 3 Tensile test results of fragmentation specimens with different matrix: (a): carbon fiber/YD-114; (b): carbon fiber/YDF-175.

3.2 섬유 미끌림 정도를 이용한 계면 상태 비교

Fig. 3은 프래그멘테이션 시편의 인장 실험을 통해 전기저항 변화도와 인장응력 결과를 나타낸 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 프래그멘테이션 시편의 인장 도중, 단 섬유 파괴 구간이다. Fig. 3(a)는 YD-114와 탄소섬유 간의 상태를 확인할 수 있으며, Fig. 3(b)는 YDF-175와 탄소섬유 간의 결과를 평가하였다. 단순히 이 결과만을 확인해 볼 경우 YDF-175 기지 조건 보다 YD-114 기지 조건에서 더 짧은 신율 조건에서 전기저항 오버로드가 발생되었다. 일반적으로 전기저항 변화도의 오버로드 결과는 높은 탄소섬유의 파괴가 발생되었음을 예측하게 한다. Fig. 2의 탄소섬유 거동 모델을 이용하여 프래그멘테이션 시편을 이용한 실험 결과인 전기저항 오버로드 발생 구간의 결과를 모델 식에 삽입하여 두 기지와 탄소섬유 간의 상태를 예측 할 수 있는 결과를 Table 1로 정리할 수 있다. FSR 정도를 나타내는 결과를 확인해 볼 때, YD-114를

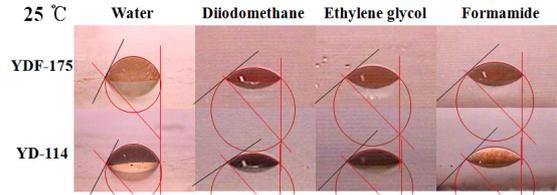


Fig. 4 Optical photos of static contact angle of actuator material with double distilled water droplet.

Table 1 ER fragmentation test results of two epoxy resin

		Stress (MPa)	$\Delta R/R_0$	Strain (%)	Fiber Slip Ratio (%)
YD-114	FS	14.7	0.023	1.50	0.05
	CF	2735.7	0.023	1.45	
YDF-175	FS	6.4	0.018	1.70	0.59
	CF	2090.0	0.018	1.11	

Table 2 Acid-base and polar-dispersion surface energy component and comparison of work of adhesion, W_a .

Type	γ_s^T	γ_s^{LW}	γ_s^{AB}	γ_s^+	γ_s^-	γ^d	γ^p	W_a
YD-114	46.0	37.4	8.6	0.9	20.2	30.2	16.2	92.9
YDF-175	44.0	41.6	2.3	0.1	17.3	28.6	14.0	89.6
CF	46.9	37.2	9.7	1.0	24.2	0.4	0.3	

기지로 활용할 때 보다 YDF-175 기지 조건에서 밀림이 더 발생되었기 때문에 강한 계면 상태임을 예측할 수 있다.

FSR의 결과뿐만 아니라, 프래그멘테이션 시편 내부에 탄소섬유가 받은 응력 결과를 부가적으로 비교하여 계면 상태를 평가 할 수 있다. 섬유 밀림 정도가 낮을수록 시편 내부 탄소섬유는 더 큰 응력을 받았다. 이는 섬유의 미끌림이 적은 계면 상태가 기지에서 받은 응력을 탄소섬유로 응력 전달이 잘되기 때문이다. 따라서 YD-114의 계면이 YDF-175 보다 강한 계면 상태임을 확인할 수 있었다.

3.3 젖음성과 접착일 평가를 통한 섬유 미끌림 정도 상호비교

Fig. 4는 젖음성 평가 결과이다. 4가지 각기 다른 성질의 측정 용액을 사용하여 본 실험에 사용한 재료간의 계면 물성을 비교 평가하였다. 일반적으로 물을 이용한 젖음성 측정 결과를 이용하여 상대적인 젖음성을 비교해 볼 때, YD-114의 표면에서는 57° 의 접촉각을, YDF-175와 같은 경우 63° 의 접촉각 결과를 얻었다. 이는 YD-114 기지일 경우가 YDF-175 기지일 경우보다 더 강한 섬유와의 접착이 될 것이라고 예측할 수 있다.

Table 2는 식 (2), (3), (4)의 식을 이용하여 계산한 접착일에 대한 결과이다. 산-염기 상호작용과 극성-분산 표면에너지 조성과 접착일을 계산하여 확인한 결과이다. 물을 이용한 젖음성 측정 결과를 통해서도 평가했듯이, YD-114 기지의

조건이 YDF-175 기지보다 계면 결합력이 높은 이유를 확인하였다. 이는 γ^T 의 결과로 설명이 가능하다. γ^T 는 재료의 표면에너지를 설명하는 데이터이다. 상대적으로 해석해보면, YD-114의 경우 46 mJ/M²의 표면에너지를 가지고 있지만, YDF-175와 같은 경우 그보다 낮은 표면에너지를 가진다. 섬유와 기지, 두 재료의 표면에너지의 측정 결과가 유사해야 그 계면에서의 접착일은 높은 결과를 얻는다. 접착일에 대한 결과를 바탕으로 확인해 볼 때, YD-114 기지와 섬유간의 계면 상태가 YDF-175 기지와 섬유의 계면보다 더 강한 접착력을 보유하고 있었다.

6. 결론

본 연구는 섬유와 기지간의 계면 물성을 평가하기 위한 방법으로 계면 물성 평가방법에 대한 연구결과이다. 탄소섬유의 인장하중 하에서의 인장 응력과 전기저항 변화도를 감지하여 0.05% 신율 간격으로 응력과 전기저항 변화도에 대한 모델화를 시도하였다. 탄소섬유 거동 모델식을 이용하여 기지 내부에 존재하는 탄소섬유의 거동을 예측하여 본 평가에 대한 섬유 미끌림 정도(FSR)를 도출하였다. 전기저항 측정법을 이용한 프래그먼테이션 실험법을 실현하기 위해, 비교 대상으로 강도의 차이가 있는 두 종류의 에폭시를 이용하여 기지로 활용하였다. 강도가 높은 에폭시인 YD-114에 탄소섬유가 함침되어 있는 경우 FSR이 0.053% 정도였으나, YDF-175와 같은 경우는 FSR이 0.591%로 매우 큰 차이가 확인되었다. 이때 발생된 시편 내부의 탄소섬유가 받은 응력 역시 2736 MPa와 2090 MPa로 차이가 있었다. YD-114 기지가 YDF-175 기지보다 강한 계면 상태임을 의미한다. 새롭게 고안한 FSR를 이용한 평가 방법에 대한 검증을 위해서, 상대적으로 해석이 가능한 젖음성 평가법을 이용해 접착일을 계산하였다. 그 결과 YD-114와 탄소섬유 간의 계면 접착일이 YDF-175와 탄소섬유간의 계면보다 큼을 확인하였다. 이러한 검증과정으로 전기저항을 이용하여 섬유와 기지간의 계면 상태를 나타내는 인자로 FSR을 활용할 수 있음을 증명하였다.

감사의 글

본 연구자 중 권동준은 2단계 BK21의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) Lubineau, G., and Rahaman, A., "A Review Of Strategies For Improving The Degradation Properties Of Laminated Continuous-Fiber /Epoxy Composites With Carbon-Based

Nanoreinforcements," *Carbon*, Vol. 50, No. 7, 2012, pp. 2377-2395.

2) Lu, P., Feng, Y.Y., Zhang, P., Chen, H.M., Zhao, N., and Feng, W., "Increasing The Interfacial Strength In Carbon Fiber/Epoxy Composites By Controlling The Orientation And Length Of Carbon Nanotubes Grown On The Fibers," *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 14, 2011, pp. 4665-4673.

3) Awal, A., Cescutti, G., Ghosh, S.B., and Mussig, J., "Interfacial Studies Of Natural Fiber/Polypropylene Composites Using Single Fiber fragmentation Test(SFFT)," *Composites: Part A*, Vol. 42, No. 1, 2011, pp. 50-56.

4) Li, J., Huang, Y., Xu, Z., and Wang, Z., "High-Energy Radiation Technique Treat On The Surface Of Carbon Fiber," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 94, No. 2-3, 2005, pp. 315-321.

5) Hickman, G.J.S., Wallace, L.F., Burks, V.A., and Hsiao, K.T., "Effects of carbon nanofiber Reinforcements in Adhesive Bonding of CFRP," 2010 SAMPE Fall, Salt lake city, Utha, U.S.A., Nov. 2010.

6) Diffrancia, C., Thomas, C.W., and Richard, O.C., "The Single-Fibre Pull-Out Test. 1: Review and Interpretation," *Composites Part A*, Vol. 27, No. 8, 1996, pp. 597-612.

7) Park, J.M., Tran, Q.S., Hwang, B.S., and DeVries, K.L., "Interfacial Evaluation Of Modified Jute and Hemp Fibers/Polypropylene (PP)-Maleic Anhydride Polypropylene Copolymers(PP-MAPP) Composites Using Micromechanical Technique And Nondestructive Acoustic Emission," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 15, 2006, pp. 2686-2699.

8) Park, J.M., Kim, D.S., and Kim, S.R., "Improvement Of Interfacial Adhesion And Nondestructive Damage Evaluation For Plasma-Treated PBO And Kevlar Fibers/Epoxy Composites Using Micro-mechanical Technuques And Surface Wettability," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 264, No. 2, 2003, pp. 431-445.

9) Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., Um, M.G., and Park, J.M., "Inherent And Interfacial Evaluation Of Fibers/Epoxy Composites By Micromechanical Tests At Cryogenic Temperature," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 4, 2011, pp. 11-16.

10) Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Lee, W.I., Park, J.K., and Park, J.M., "Plasma Treatment Of Carbon Nanotubes And Interfacial Evaluation Of CNT-Phenolic Composites by Acoustic Emission And Dual Matrix Techniques," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, No. 3, 2012, pp. 76-81.

- 11) Shindo, Y., Kuronuma, Y., Takeda, T., Narita, F., and Fu, S.Y., "Electrical Resistancne Change and Crack Behavior In Carbon Nanotube/Polymer composites Under tensile Loading," *Composites Part B*, Vol. 43, No. 1, 2012, pp. 39-43.
- 12) Grammatikos, S.A., and Paipetis, A.S., "On the electrical properties of multi scale reinforced composites for damage accumulation monitoring," *Composites Part B*, Vol. 43, No. 6, 2012, pp. 2687-2696.
- 13) Fern, N., Alam, P., Touaiti, F., and Toivakka, M., "Fatigue Life Predictions of Porous Composite Paper Coatings," *International Journal of Fatigue*, Vol. 38, 2012, pp. 181-187.
- 14) Gao, L.M., Chou, T.W., Thostenson, E.T., Zhang, Z., and Coulaud, M., "In Situ Sensing Of Impact Damage In Epoxy/Glass Fiber Composites Using Percolating Carbon Nanotube Networks," *Carbon*, Vol. 49, No. 10, 2011, pp. 3371-3391.
- 15) Park, J.M., Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Lee, W.I., Park J.K., and DeVries K.L., "Self-Sensing Of Carbon Fiber/ Carbon Nanofiber-Epoxy Composites With Two Different Nanofiber Aspect Ratios Investigated By Electrical Resistance And Wettability Measurements," *Composites Part A*, Vol. 41, No. 11, 2010, pp. 1702-1711.
- 16) Li, C., and Chou, T.W., "Modeling of damage sensing in fiber composites using carbon nanotube networks," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, Vol. 15-16, 2008, pp. 3373-3379.