

대용량 SiC 나노입자 강화 에폭시 복합재료의 새로운 분산방법

권동준* · 신평수** · 김종현** · 박종만***†

A New Mixing Method of SiC Nanoparticle Reinforced Epoxy Composites with Large Concentration of SiC Nanoparticle

Dong-Jun Kwon*, Pyeong-Su Shin**, Jong-Hyun Kim**, Joung-Man Park***†

ABSTRACT: SiC nanoparticles were used to increase flexural properties of polymer matrix. This study was to manufacture huge concentration SiC nanoparticle/epoxy composites and to evaluate the dispersion. During mixing SiC nanoparticle and epoxy, 20 wt% SiC nanoparticle in total composites was used with both stirrer and sonication equipment together. Mixing speed and dispersion were improved with the method by using both stirrer and sonication equipment at the same time via mechanical test and FE-SEM. Based on the results, modeling of SiC nanoparticle dispersion could be established. Ultimately, unidirectional carbon fiber reinforced composites was manufactured using 20 wt% SiC nanoparticle/epoxy. Mechanical property of CFRP using dual stirrer and sonication mixing method was better than composites by single sonication mixing method.

초 록: SiC 나노입자는 고분자 수지의 굴곡특성을 강화하기 위해 사용된다. 본 연구는 대용량 SiC 나노입자가 함유된 에폭시 수지를 제조하고 분산도를 평가한 것에 관한 내용이다. SiC 나노입자를 혼합하는 과정에 교반기와 초음파 분쇄기를 동시에 사용하여 20 wt%의 SiC 나노입자 강화 에폭시 복합재료를 제조하였다. 교반기와 분쇄기를 동시에 이용하는 방법으로 분산속도와 분산도가 개선됨을 기계적 물성 평가와 FE-SEM 결과로 확인하였다. 이러한 결과로 SiC 나노입자의 분산 모델을 구축하였다. 궁극적으로, 탄소섬유(UD 타입)와 20 wt% SiC 나노입자 강화 에폭시 수지를 사용하여 복합재료를 제조하였다. 교반기와 분쇄기를 동시에 사용했을 경우 초음파 분쇄기만 이용했을 경우에 비해 우수한 복합재료의 물성을 나타내었다.

Key Words: 탄화규소(SiC), 분산(Dispersion), 에폭시(Epoxy), 혼합 방법(Mixing method)

1. 서 론

SiC 섬유는 내열성을 요구하는 복합재료 분야에 사용되지만 SiC 나노입자는 고분자 기지 내에서 굴곡강도를 크게 향상시키기 때문에 강인성을 요구하는 복합재료 분야에 사용된다[1]. SiC 나노입자는 형상이 크게 2종류가 있으며, 위

스커 타입과 베타 타입으로 나누어진다[2]. 위스커 타입은 강성을 높이는 하지만 탄성력을 높이는 데 제한이 있으며 섬유강화 복합재료를 제조할 경우 섬유에 SiC 위스커 타입이 필터링 되면서 적절하지 못한 강화제로 확인되었다. 하지만 베타 타입의 경우 구형태의 결과를 나타내며 섬유 강화 복합재료에 첨가제로 사용해도 수지의 특성을 강화

Received 26 June 2016, received in revised form 29 August 2016, accepted 30 August 2016

*Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

**Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

***†Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

시키기에 효과적이다[3]. SiC 나노입자의 경우 단가가 높은 편이며, 국산 제품에 비해 외국의 제품 품질이 우수하기 때문에 추가적인 개선이 필요한 상황이다. SiC 나노입자는 강한 결합력을 형성하기 때문에 내열, 내마모, 내화학성에 대한 특성 강화 강점이 있으며, CNT에 비해 분산이 용이하여 경화제로 사용된다면 효과적인 경화제라고 설명할 수 있다[4].

SiC와 유사한 구조계 강화제로는 SiO_2 가 있으며 SiO_2 는 SiC에 비해 고분자 수지의 인장강도 강화 효과에 특색은 있으나 굴곡이나 강인성이 부족하다[5]. 이러한 점을 개선하기 위해 비드 상태의 SiO_2 강화제가 사용되고도 있는 상황이다[6].

나노입자를 이용한 상용화를 위해서는 아직 부족한 부분이 많다. 특히 분산도의 문제이다[7]. 현재 실험실에서 사용하는 나노입자의 함량은 대부분 0.5~5 wt% 수준이며 대용량으로 혼합된 경우는 15 wt% 이상으로 CNT/에폭시 필름이 제조된 결과가 있다[8,9]. 나노입자가 고농도로 함유될 경우 발생하는 문제도 있지만, 이를 해결하기 위해 화학적 표면처리로 나노입자간 사이간격과 고분자 기지간의 친화도를 개선시키는 연구로 분산도를 해결하고자 연구가 진행되고 있다[10]. 또한 기계적인 분쇄방법을 통해 3 롤 밀과 같이 혼합과정을 가지면서 나노입자의 응집을 해소시키기도 한다[11].

분산도의 문제 이외에 분산 공정의 시간 단축도 해결해야 할 문제이다. 분산 과정에서 사용되는 공정은 교반기를 이용하거나 초음파 분쇄기를 이용하는 경우이다. 50 ml~1 L 비커에서 분산을 시도할 경우 큰 문제는 없다. 하지만 5 kg의 나노입자 혼합 수지를 제조한다거나 공정에서 사용하기 위해서 사용될 20 kg의 드럼을 제조해야 한다면 나노입자 혼합 공정 시간이 짧아야만 한다.

본 연구에서는 SiC 나노입자를 에폭시에 혼합시킬 때 사용되는 공정 시간을 단축하기 위한 연구를 실시하였다. 대용량으로 SiC 나노입자를 분산하기 위해 20 wt% SiC 혼합 에폭시 수지를 제조하는 것을 목표하였다. 분산 시간을 단축하기 위해 초음파 분쇄기와 교반기를 사용했으며, 교반기의 각도, 교반속도, 가열 온도에 따른 최적의 분산 조건을 비교평가하였다. 제조한 SiC/에폭시의 인장, 압축 강도를 비교하여 분산 정도를 평가하였으며, FE-SEM 측정을 통해 SiC의 분산상태를 확인하였다. 궁극적으로 UD 탄소섬유에 SiC/에폭시 수지를 핸드레이업방법으로 복합재료를 제조하여 대용량 SiC/에폭시의 실현 가능성을 확인하였다.

2. 실험

2.1 대용량 SiC 나노입자 분산방법

20 wt%의 SiC 나노입자 혼합 에폭시(SiC: 1 kg, 에폭시: 4 kg)를 제조하기 위해 교반기와 초음파 분쇄기를 동시에 사용하는 방법으로 혼합과정을 실시하였다. Fig. 1과 같이

일반적으로 알려진 분산 방법은 총 4개정도가 존재한다. 초음파 분쇄기를 단일로 사용하여 분산시키는 방법, 초음파 분쇄기를 이용하면서 용기의 아래 부분에 나노입자가 침전되는 문제를 해결하기 위해 마그네틱 바를 이용하여 교반을 시키는 방법, 초음파 분쇄기를 2개 활용하여 분산시키는 방법 마지막으로 초음파 분쇄기와 교반기를 이용하는 방법이 있다[12]. 문제는 Fig. 1의 (e)와 같이 침전이 발생된다는 점이며, 20 wt% SiC가 함유된 에폭시 복합재료를 제조하기 위해서는 새로운 방법의 혼합 방법이 필요로 하였다.

따라서 고안한 것이 Fig. 1(d)의 분산방법을 개선시켜 Fig. 2와 같이 분산을 시도하였다. 분산을 시키는 과정에서 교반기의 각도를 주어 교반을 시킬 경우 교반되는 공정에서 에폭시 유체가 회전하는 반경이 커지기 때문에 SiC 입자의

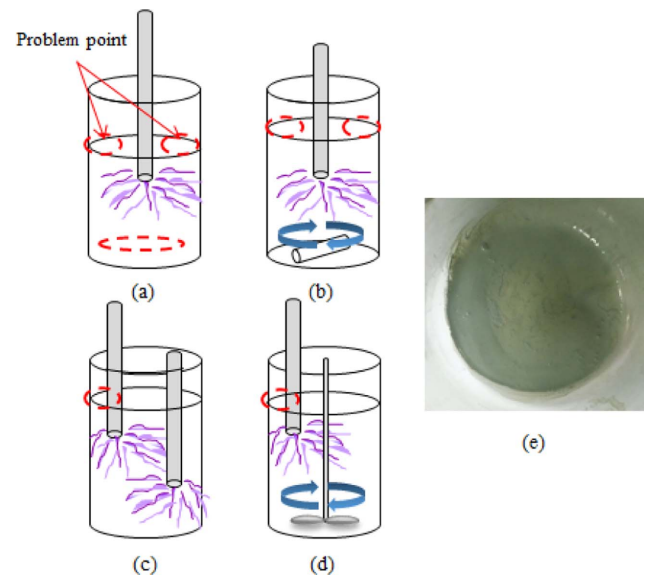


Fig. 1. Schematic models of SiC dispersion method: (a) sonication; (b) sonication plus magnetic; (c) double sonication; and (d) stirrer plus sonication

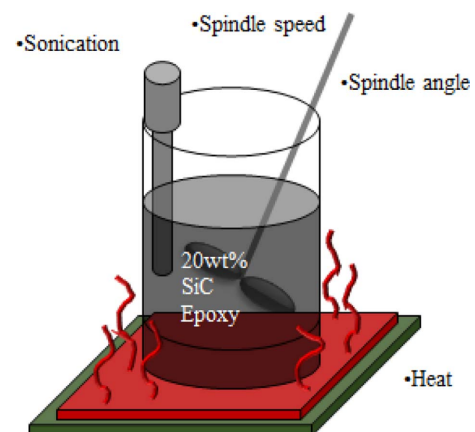


Fig. 2. Schematic model of dual mixing method for SiC/epoxy paste

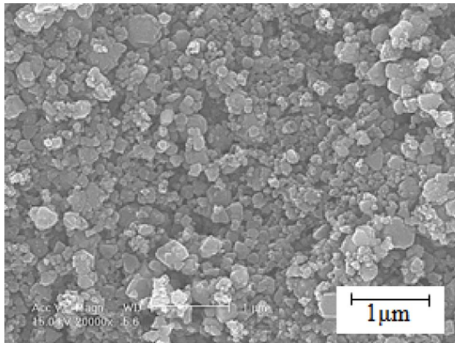


Fig. 3. FE-SEM of SiC nanoparticle

분쇄과정이 활발히 일어날 수 있었다. Fig. 2의 공정대로 분산을 시도하기 위해서는 4가지의 변수가 존재하며, 교반속도, 교반각도, 가열온도가 핵심적인 변수이다. 초음파 분쇄기(VC505, Sonics LTD, 미국)의 조건은 0.5 s 사이클에 50% 앰프리튜드 조건으로 1시간 분산조건을 설정했다. 교반기는 오버헤드 스티러(DH.WOS01076, 대한과학)를 이용했으며, 임펠라의 조건은 스테인레스 스틸로 만들어진 4날형(Rod Φ 8 × L500 mm, Blade Φ 90 mm) 타입이다.

분산 조건은 교반기의 각도에 따른 영향, 가열온도에 따른 영향, 교반 속도에 의한 영향에 대해 최대 SiC/에폭시 수지가 혼합되는 시간과 인장강도를 정리하여 최적 분산조건을 도출하였다. SiC(55-SiC, Advanced materials Co., 미국)는 일반적으로 Fig. 3과 같이 베타 타입에 55 nm의 직경을 가진 구형 입자를 사용하였다. 에폭시 수지는 국도화학의 비스페놀 A 타입의 YD-128을 사용했으며, 경화제는 국도화학의 산무수물계 경화제로 KBH-1089를 이용했다.

2.2 SiC/에폭시 수지에 대한 분산도 평가 및 기계적 강도 평가

SiC/에폭시 수지를 5 kg으로 제조하는 것을 기본으로 하여 5 kg내에서 100 g를 비커에 덜어 담고 경화제와 SiC/에폭시 수지의 비율을 1:1로 혼합하였다. 경화온도는 120도 한 시간으로 시편을 경화시켰다. SiC/에폭시의 인장측정은 ASTM 규격 D 638을 기반으로 시편을 제조했으며, SiC/에폭시의 압축강도는 브로트만 시편을 이용하여 평가하였다. Fig. 2와 같이 새롭게 고안한 대용량 분산방법으로 SiC/에폭시를 제조한 결과와 일반적으로 초음파 분쇄기를 한 개만 이용한 결과를 비교하여 분산도 개선의 영향을 확인하였다. 인장 시편의 파단면을 관찰하기 위해 FE-SEM을 이용했으며, SiC의 분산정도와 시편의 파단 경로에 대해 관찰하였다.

탄소섬유강화 SiC/에폭시 복합재료를 제조하기 위해 탄소섬유(UD type 30톤, 미쯔비씨레이온, 일본)를 고정시키고 SiC/에폭시 수지를 핸드 레이업 방법으로 발라 2 mm의 두께를 가지는 200 × 200 mm 크기의 시편을 성형하였다.

성형 후 복합재료의 물성을 평가하기 위해 ASTM D2344, ASTM D3039, ASTM D790 기준을 이용하여 층간전단강도, 인장강도, 굴곡강도를 분석하였다[13-15]. 궁극적으로 SiC 분산방법에 따른 기계적 강도의 개선정도를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 20 wt% SiC/에폭시 제조 방법에 대한 최적화 조건 정리

대용량 분산을 시도하기 위해 사용한 Fig. 2와 같은 조건에서는 우선 교반각도의 차이가 분산도에 미치는 영향을 확인하였다. 에폭시 내에 SiC 나노입자가 분산되는 시간을 정의하면, 나노입자의 응집이 육안으로 확인되지 않고, 수지 내에 SiC 입자의 응집이 확인되지 않는 시간을 의미한다. Fig. 4는 교반기의 기울어진 각도차이에 의해 수지 표면에 SiC 입자가 수지 내로 함침되는 시간을 측정 한 결과이다. 위 결과를 통해 확인할 수 있듯이 교반기의 각도에 따라 수지 표면에 SiC 입자가 수지내로 함침되는 시간이 달라짐을 확인할 수 있었다. 특히 교반기의 기울기를 45도로 했을 경우 수지 표면에 존재하던 SiC 나노입자가 수지내로 함침되는 시간이 교반기를 0도 조건으로 설정한 것보다 시간이 줄어들었다.

하지만 각도가 60도로 변경될 경우 SiC 나노입자에 대한 수지 내 함침 시간이 다시 증가되는 결과를 바탕으로 최적의 교반기 기울어짐 각도는 45도였다.

Fig. 5는 교반기의 속도를 다르게 했을 경우 확인되는 SiC 나노입자의 함침시간과 인장강도의 차이를 관찰한 결과이다. 600 rpm 조건으로 했을 경우 분산시간은 길고 SiC 에폭시 복합재료에 대한 인장강도는 낮았다. 하지만 800 rpm 이

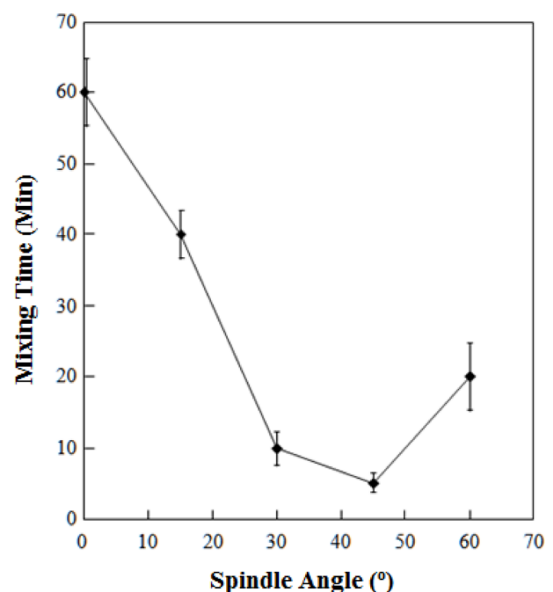


Fig. 4. Mixing time of SiC/epoxy paste with different spindle angles

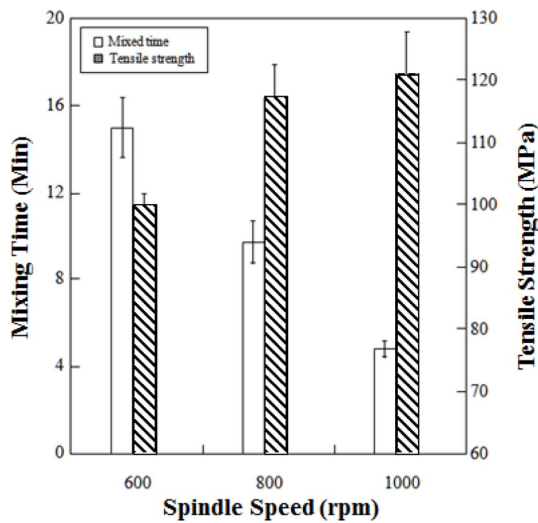


Fig. 5. Mixing time and tensile strength of SiC/epoxy paste with different spindle rpm

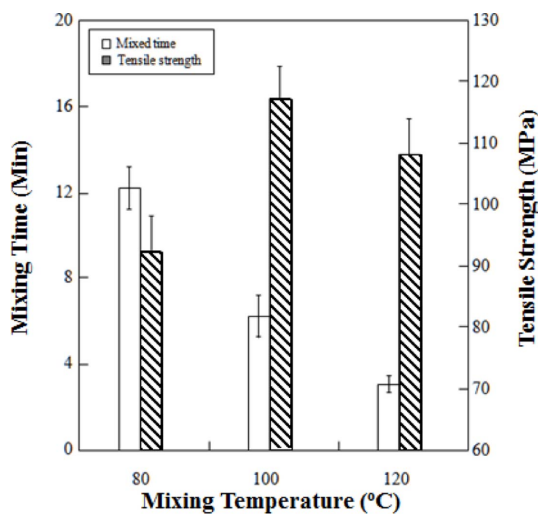


Fig. 6. Mixing time and tensile strength of SiC/epoxy composites with different heating conditions

상으로 교반을 시도할 경우 분산시간은 지속적으로 줄어들고 인장강도의 결과가 지속적으로 향상하였다. 분산시간을 줄이기 위한 조건이 중요하기 때문에 rpm의 조건은 1000으로 하는 것이 최적이었다.

Fig. 6과 같이 가열 온도가 높아짐에 따라 SiC/에폭시 수지를 제조하는 시간이 줄어들었다. 이러한 이유는 에폭시 수지의 경우 경화제를 넣지 않은 순수 수지의 상태이기 때문에 열을 받음으로써 수지의 점도가 상온일 때의 경우보다 매우 크게 줄어들게 된다(12,000 cp/25°C–1,000 cp/120°C). 수지의 점도가 줄어들며 따라 SiC 나노입자를 수지 내로 함침 시키는 능력이 높아지고, 그에 따라 SiC/에폭시에 대한 인장강도의 결과도 높아짐을 확인할 수 있었다. 하지만 너무 높은 온도에서 지속적인 분산을 시킬 경우 수지에 영향이 존재하며, 나노입자가 높은 온도 조건에서는 분산상태

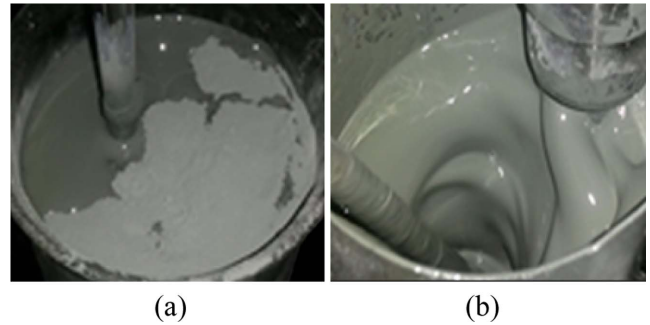


Fig. 7. Mixing method of SiC/epoxy paste with different mixing conditions: (a) sonication in Fig. 1(a); and (b) dual mixing method (stirrer plus sonication) in Fig. 2

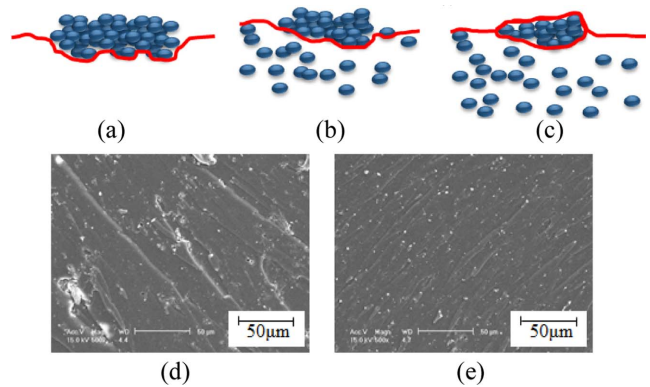


Fig. 8. Mixing modeling and FE-SEM results of SiC/epoxy paste with different mixing methods: (a) first step for mixing; (b) dispersed SiC particle; (c) long time dispersed SiC; (d) sonication in Fig. 1(a); and (e) dual mixing method (stirrer plus sonication) in Fig. 2

가 용이했지만 상온에서 수지가 식을 경우 SiC 나노입자가 쉽게 침전되는 문제가 발생되었다. 따라서 100도의 가열조건이 최적의 조성이었다.

Fig. 7은 분산 방법의 차이로 확인되는 SiC/에폭시 수지의 혼합 과정에서의 차이를 확인한 결과이다. Fig. 7(a)의 경우 초음파 분쇄기가 작동되고 있지만 수지 내로 SiC 입자가 스며들지 못하고 수지 표면에 존재하고 있음을 확인하였다. 반면 Fig. 7(b)의 결과는 교반기의 기울기를 45도로 하여 수지의 유동을 높였고 초음파 분쇄기가 SiC 응집을 파쇄하도록 함으로써 수지 표면 위에 SiC 입자가 존재하지 않고 수지 내에 SiC 입자가 함유되도록 공정이 적용되었다. 특히 시간의 차이가 매우 컸다. Fig. 7(a)와 같은 방법으로 5 kg의 SiC/에폭시 수지를 제조하는데 2일이 걸렸으나, Fig. 7(b)와 같은 방법으로는 2시간 만에 5 kg의 SiC/에폭시 수지를 제조할 수 있었다. Fig. 8(a), (b), (c)는 SiC/에폭시 수지 제조시 확인되는 분산 모델을 나타낸 결과이다. 분산과정에서 나노입자는 수지 내로 함침되기 시작하는데 궁극적으로 수지 내에 함침될 때 Fig. 8(c)와 같은 구조가 생성된다.

이때 발생하는 응집체의 크기를 줄이는 것이 분산도의 개

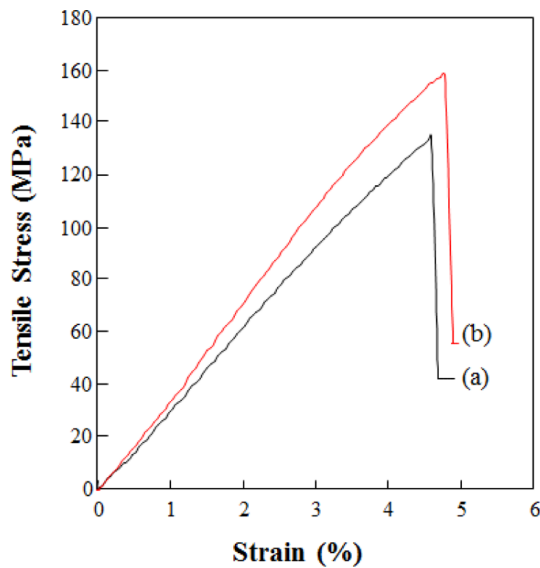


Fig. 9. Tensile stress of SiC/epoxy composites with different mixing methods: (a) sonication in Fig. 1(a); and (b) dual mixing method (stirrer plus sonication) in Fig. 2

선 방법이며, 듀얼 혼합 분산법을 이용할 경우 수지의 유동이 크게 형성되어 SiC 응집이 작게 형성됨을 확인하였다. Fig. 8(d),(e)은 혼합 방법이 다른 SiC 수지를 FE-SEM용 마운트에 고정시키고 SiC의 분산 상태를 확인한 단면 결과이다. 일반적으로 초음파 분쇄기를 이용한 분산 결과는 SiC 입자의 응집 구간이 확인되지만 교반기를 45도 기울이고 초음파 분쇄작업을 한 결과는 SiC 나노입자의 분산이 균일하였다.

Fig. 9는 분산 방법의 차이에 따라 SiC/에폭시에 대한 인장 강도의 차이를 분석한 결과이다. 인장시험은 5번의 재현성 입증에 위한 실험을 진행하였고, 위 결과는 대표 평균 결과를 정리하였다. 듀얼 믹싱 방법을 이용하여 SiC/에폭시 복합재료를 제조할 경우 인장강도가 초음파만 이용하여 분산시킨 경우에 비해 높게 확인되었다.

Fig. 10의 결과는 인장 실험에 의한 시편의 파단을 나타낸 결과이다. 자료에서 볼 수 있듯이 초음파 분쇄기만 이용했을 경우 파단면에서 에폭시 파단면이 크게 형성되어 있

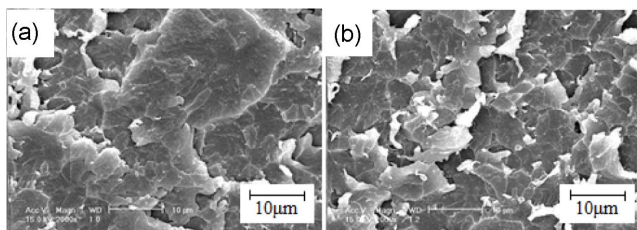


Fig. 10. FE-SEM photos of tensile fracture surface of SiC/epoxy composites with different mixing methods: (a) sonication in Fig. 1(a); and (b) dual mixing method (stirrer plus sonication) in Fig. 2

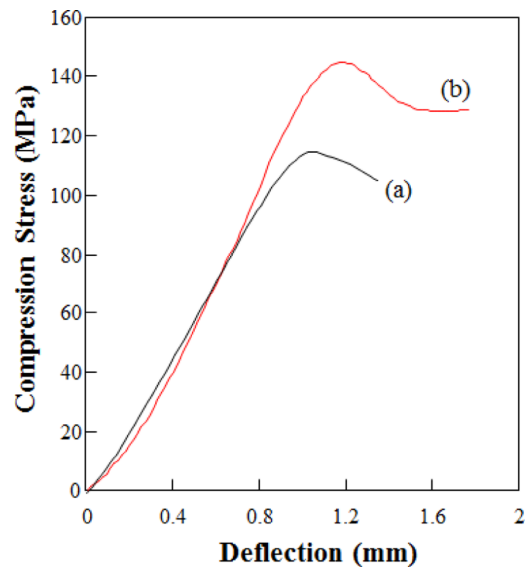


Fig. 11. Compressive test of SiC/epoxy composites with different mixing methods: (a) sonication in Fig. 1(a); and (b) dual mixing method (stirrer plus sonication) in Fig. 2

고 모서리 부분에 SiC로 추정되는 입자들이 확인되었다. 즉 SiC 나노입자의 강화 효과로 인한 균열지연에 대한 효과가 적은 상태의 SiC/에폭시임을 확인할 수 있었다. 하지만 듀얼 혼합 분산방법을 이용했을 경우 SiC 나노입자에 의한 균열 파단면이 FE-SEM 결과에서 균일하게 확인되었다. 이를 통해 듀얼 혼합 분산 방법이 SiC 분산도 개선에 영향을 주었다.

Fig. 11의 결과는 브로트만 시편을 이용하여 SiC/에폭시의 압축강도 비교를 한 결과이다. 분산방법의 차이에 따라 압축강도의 차이가 인장강도의 결과보다 더 크게 나타났다. SiC 입자가 에폭시 내부에 압축응력을 받는 경우 강화제에 응력이 전달된다. 하지만 인장응력을 받을 경우 SiC 입자 자체의 응력보다는 SiC와 에폭시 수지와와의 계면접착력이 영향을 주게 된다. 따라서 SiC 입자를 넣음으로써 압축 응력 강화효과가 인장 응력 강화효과보다 크게 나타났다고 설명할 수 있었다.

3.2 SiC/에폭시의 제조 방법에 따른 탄소섬유강화 SiC/에폭시 복합재료의 기계적 강도 차이 분석

Fig. 12는 탄소섬유에 20 wt% SiC/에폭시 수지를 함침시켜 prepreg를 제조했을 때의 표면을 FE-SEM으로 측정한 결과이다.

Fig. 12(a)에서는 SiC 나노입자의 응집이 크게 섬유와 섬유사이의 계면 층에 형성되었다. 하지만 Fig. 12(b)와 같이 듀얼 혼합 분산방법으로 SiC/에폭시를 제조한 수지를 사용했을 경우 섬유와 섬유사이의 계면에 SiC 나노입자의 구성이 분산도가 균일하게 형성되어 있었다. 표면의 상태를 만 배로 확대시켜 Fig. 12(c),(d)를 확인해 볼 수 있었다. SiC 나노입자의 응집크기를 대략 예측해볼 수 있었으며, 초음파

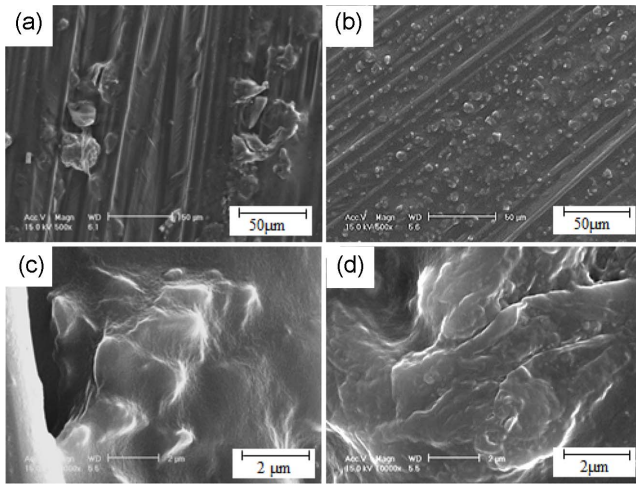


Fig. 12. FE-SEM photos of surfaces of CF/20wt% SiC/epoxy prepreg with different mixing methods: (a), (c) sonication in Fig. 1(a); and (b), (d) dual mixing method (stirrer plus sonication) in Fig. 2

Table 1. Mechanical properties of carbon fiber reinforced SiC/epoxy composites with different mixing methods

Properties	Method	Unit	Sonication	Dual mixing method
0° Flexural Modulus	ASTM D790	GPa	145 (20)*	161 (15)
0° Flexural Strength	ASTM D790	MPa	1750 (40)	1964 (23)
0° Interlaminar Shear Strength	ASTM D2344	MPa	85 (18)	101 (12)
0° Tensile Modulus	ASTM D3039	GPa	150 (30)	163 (24)
0° Tensile Strength	ASTM D3039	MPa	2200 (19)	2310 (12)

(*)*: Standard deviation

분쇄기만 이용하여 분산을 시도했을 경우 SiC 입자의 응집 정도가 대략 50 μm 정도임을 확인했다. 하지만 Fig. 12(d)의 결과에서는 응집 정도가 눈으로 확인되기 매우 작은 사이즈이며, 대략 10 μm 정도임을 확인할 수 있었다.

Table 1은 탄소섬유 강화 20 wt% SiC/에폭시 복합재료에 대한 기계적 물성을 평가한 결과를 정리한 것이다. 물성에 대해서는 UD 0도 방향에 대해서 복합재료 특성을 평가하였다. 굴곡강도, 인장강도 모두 SiC 나노입자를 듀얼 혼합 분산방법으로 진행시킨 결과가 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 특히 ILSS와 같이 복합재료의 계면 특성을 나타내는 결과를 바탕으로 SiC 나노입자의 분산도가 복합재료의 계면에 미치는 중요한 영향임을 확인할 수 있었다. SiC 나노입자가 균일하게 분산되었던 Fig. 12(b)의 결과와 같이 듀얼 혼합 분산방법으로 SiC/에폭시를 제조하였을 경우 복합재료의 층간전단강도가 100 MPa 이상으로 확인되었다. 반면 분산도가 균일하지 않았던 단일 초음파 분쇄법을 이

용한 SiC/에폭시의 경우 층간전단강도가 80 MPa로 낮은 상태였으며, Table 1의 결과를 바탕으로 SiC 나노입자의 분산 결과가 복합재료의 기계적 특성에 큰 영향을 주었다.

4. 결 론

본 연구는 SiC 나노입자를 20 wt%로 에폭시 내에 분산시키는 듀얼 혼합 분산방법에 관한 내용이다. SiC 나노입자를 에폭시 수지에 혼합시키는 방법에 대해 듀얼 혼합 분산방법을 고안하여 교반각의 각도에 따라, 가열 온도에 따라, 교반 속도에 따른 SiC/에폭시 수지의 인장강도와 혼합 시간에 대해 확인하였다. 교반각을 45도 각도로 꺾어서 초음파 분쇄기를 이용한 분산방법의 경우 가열판에서 교반을 시도하기 때문에 에폭시의 온도가 높아져 점성이 낮은 상태에서, 강한 교반이 가능해진다. 이를 이용하여 듀얼 혼합 분산방법으로 대용량으로 SiC 나노입자 혼합 에폭시 복합재료의 제작이 가능하였다. 일반적으로 단일 초음파 분쇄법을 이용하는 경우와 듀얼 혼합 분산법을 이용하여 SiC/에폭시 수지를 제작하였으며, 인장, 압축에 대한 SiC/에폭시 자체의 기계적 특성과 분산도를 평가해보았다. 또한 탄소섬유강화 20 wt% SiC/에폭시 복합재료를 제작하여 기계적 강도와 ILSS를 확인해 보았을 때 듀얼 혼합 분산방법을 이용해 SiC/에폭시 수지를 제작한 것이 우수한 특성을 나타내었다. 따라서 대용량 SiC/에폭시 수지를 제작할 경우 듀얼 혼합 분산방법으로 분산도 개선이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 일반연구지원사업, 기초연구과제(2013R1A1A2058093)의 후원으로 수행했습니다. 저자 중 신평수, 김종현은 BK-21 Plus 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Choi, J.Y., Shin, P.S., Kim, J.J., Jang, K.W., DeVries, K.L., and Park, J.M., "To Improve Interfacial and Mechanical Properties of Carbon Fiber-modified Nano-SiC-epoxy Composites Using Dispersion and Wetting Control," *Advanced Composites Materials*, Vol. 24, 2015, pp. 1-12.
2. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Kim, J.J., Jang, K.W., and Park, J.M., "Prediction Method of Dispersion Condition for Reinforced Epoxy in Nano SiC Particles Using Capacitance Measurement," *Composites Research*, Vol. 26, 2013, pp. 1-7.
3. Hui, H., Alexander, B., Emile, S.G., and Milo, S.P.S., "Carbon Nanotube Grafted Silica Fibres: Characterising The Interface at The Single Fibre Level," *Journal of Composite Science and Technology*, Vol. 70, 2010, pp. 393-399.
4. Kwon, D.J., Choi, J.Y., Shin, P.S., Lee, H.I., Lee, M.G., Park, J.K., and Park, J.M., "Prediction of Wetting and Interfacial Property

- of CNT Reinforced Epoxy on CF Tow Using Electrical Resistance Method,” *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 232-238.
5. Vlastimil, M., Lu, Y., Li, H., Simha, G.M., and Vladimir, T., “Effects of Silicon Carbide Particle Sizes on Friction-wear Properties of Friction Composites Designed for Car Brake Lining Applications,” *Tribology International*, Vol. 43, 2010, pp. 144-151.
 6. Magnant, J., Laurence, M., Rene, P., Jean, C.I., Alain, G., Francis, R., and Eric, P., “Carbon Fiber/Reaction-Bonded Carbide Matrix for Composite Materials—Manufacture and Characterization,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 32, 2012, pp. 4497-4505.
 7. Park, J.M., Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Lee, W.I., Park, J.G., and DeVires, K.L., “Optimum Dispersion Conditions and Interfacial Modification of Carbon Fiber and CNT-Phenolic Composites by Atmospheric Pressure Plasma Treatment,” *Composites Parts: B*, Vol. 43, 2012, pp. 2272-2278.
 8. Wang, Z.J., Kong, J., Lee, W.I., Park, J.G., and Park, J.M., “Interfacial Properties of Gradient Specimen of CNT-Epoxy Nanocomposites using Micromechanical Technique and Wettability,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, 2009, pp. 8-14.
 9. Barton, A.F.M., “CRC Handbook of Solubility Parameters and other Cohesion Parameter,” CRC Press, Boca Raton, Fla, 1983, pp. 85.
 10. Xia, S., Jong, K.L., and Michael, R.K., “Effects of Silane Functionalization on the Properties of Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 2965-2972.
 11. Thostenson, E.T., and Chou, T.W., “Processing Structure Multi Functional Property Relationship in Carbon Nanotube/epoxy Composites,” *Carbon*, Vol. 44, 2006, pp. 3022-3029.
 12. Jang, J.H., Yi, J.W., Lee, W.O., Lee, H.G., Um, M.K., Kim, J.B., and Byun, J.H., “Dispersion and Property Evaluation of Nanocomposites by Aspect Ratio of MWCNT,” *Composites Research*, Vol. 23, 2010, pp. 58-63.
 13. Lee, G.H., Roh, J.U., and Lee, W.I., “Processing and Flexural Properties of Chopped Jute Fiber Reinforced PLA Sandwich Composites,” *Composites Research*, Vol. 27, 2014, pp. 96-102.
 14. Yoon, S.J., Kim, M.S., and Jang, S.Y., “Effects of Microcapsules on Mechanical Properties and Thermal Stability of Microcapsule Embedded Polymeric Resins,” *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 316-321.
 15. Lee, B.N., Kim, C.H., Kweon, J.H., and Choi, J.H., “Evaluation of Dispersivity and Resistance of the Adhesive Joint According to Dispersion Methods of CNT,” *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 348-355.