

Capacitance 측정법을 이용한 나노 SiC 에폭시 복합재료의 내부 강화재 분산 예측방법

권동준* · 왕작가* · 김제준** · 장기욱** · 박종만*†

Prediction Method of Dispersion Condition for Reinforced Epoxy in Nano SiC Particles Using Capacitance Measurement

Dong-Jun Kwon*, Zuo-Jia Wang*, Je-Jun Kim**, Key-Wook Jang**, Joung-Man Park*†

ABSTRACT: The good dispersion of nano-materials in epoxy matrix was important parameter for the reinforcement effect, and the evaluation of dispersion degree was to prove it. This work was studied to predict the dispersion condition of nano-SiC powders in SiC/epoxy composites using capacitance measurement. Capacitance was defined to be the electric capacity in proportional to electron charge of the measuring section. In case of nano-SiC powders, the electron charge of SiC/epoxy composites was higher than that of neat epoxy resin. Capacitance was evaluated for each section of SiC/epoxy composites. The prediction of dispersion condition was verified by using capacitance measurement. Dispersion condition of nano-SiC powders in epoxy matrix was evaluated with two different dispersion methods, i.e., sonication and stirring methods. The dispersion degree was also verified with the tensile strength correlating to capacitance.

초 록: 나노입자를 이용하여 강화 효과를 높이기 위해서는 고분자 기지 내부의 균일한 분산 상태를 확보하여야 한다. 또한 균일분산 조건 확보 후 균일 분산상태를 증명할 평가자료가 필요하다. 본 연구는 에폭시 수지와 SiC 나노입자를 혼합한 SiC/에폭시 복합 수지를 제조할 경우 커패시턴스 측정법을 이용한 강화재 분산도 예측 연구를 진행하였다. 커패시턴스는 전기용량을 의미하며 측정 재료의 내부 전하량과 비례한다. 기존 에폭시 수지에 비해 나노 SiC 입자를 함유할 경우 전하량이 증가되는 이론을 바탕으로 구간별 커패시턴스 측정에 따른 분산도 평가를 진행하고, 커패시턴스 분산도 예측방법에 대한 타당성을 FE-SEM과 물리적 강도 증가 방법으로 평가하였다. 소니케이션 분산 방법과 교반기 분산 방법을 이용하여 분산 방법에 따른 SiC 나노입자 분산도 상태를 비교하였다. 인장강도와 커패시턴스 간의 상관관계가 있었으며, 파단면에 대한 비교를 할 때 분산성 향상에 대한 차이를 확인할 수 있었다.

Key Words: 커패시턴스(capacitance), SiC(Silicon carbide), 분산도(dispersion degree), 나노복합재료(nanocomposites)

1. 서 론

나노소재 제조 공정의 개발에 따라 다양한 나노사이즈의 강화재가 개발되었다[1]. 그 중 탄소계 강화재에 대한 활

용이 가장 많으나, SiC와 같은 무기물을 이용한 강화재의 응용이 시도되고 있다[2]. 나노 SiC 강화재의 활용으로는 고강도, 높은 굴곡강도와 같은 기계적 물성 강화를 목적으로 하거나, 내열성 강화의 목적으로 고분자 수지에 혼합하여

Received 22 June 2013, received in revised form 23 November 2013, accepted 18 December 2013

*경상대학교 나노신소재융합공학과 고분자공학전공 대학원

*†경상대학교 나노신소재융합공학과, 공학연구원, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

**㈜티카본 복합신소재 연구소

사용한다[3]. 응용 분야로는 굴곡 강도가 크게 요구되는 낚시대 시대에 이용될 수 있으며, 대표적으로 3M사에서 개발한 Powerlux라는 수지가 있다[4]. 에폭시 수지의 열적 수축성을 개선하고, 내수성 및 경도를 향상시킨 수지이다. 하지만 나노입자에 대한 활용 효과를 높이기 위해서는 고분자 기지 내 나노입자가 균일한 분산상태를 이루도록 해야 한다. 이는 강화재의 분산상태가 균일하지 않으면, 강화재간 응집이 발생되어 외부 하중에 따른 응력전달과 응력분산이 불균일하게 되어 기존의 물성보다 낮은 물성을 나타내기 때문이다[5]. 따라서 최적의 강화재 강화효과를 확보하기 위해 고분자 기지내부에 균일분산상태를 유지하도록 하여야 한다.

균일한 강화재의 분산상태를 확보하는 것뿐 만이 아니라, 나노입자에 대한 분산 상태를 규명하는 것 중요하다[6]. 일반적으로 사용되는 강화재 입자의 분산도 평가방법은 시편의 파단된 단면 또는 재료의 표면을 FE-SEM, TEM 등을 이용한 현미경 촬영 방법이 있다. 하지만 이러한 방법은 미세한 부분에 대한 측정을 하기 때문에 시료 전체의 분산 상태를 규명하기 어려운 분석방법이라 말할 수 있다. 탄소계 강화재는 부도체인 고분자 수지를 도체로 변화시킨다. 탄소계 강화재의 전도성을 이용하여 부피저항 측정에 따른 분산도 평가 방법이 있다[7]. 일정한 부피를 가지는 직육면체 시편을 만들어 시편 내부에 균일한 간격을 설정한 뒤 구간별 부피저항을 측정한다. 구간별 부피저항을 평균, 표준편차, 편차계수(C.O.V.) 3가지의 통계적 분석으로 나노입자 분산 수지에 대한 분산도를 비교한다.

위에서 설명한 부피저항 측정법을 이용한 평가 방법은 쉽고 빠르게 강화재에 대한 분산 상태를 예측한다는 장점이 있다. 하지만 탄소계 강화재와 같이 전도성을 지니는 강화재를 활용할 경우만 가능한 평가방법이기 때문에 측정이 제한적이다. 부피저항 평가방법과 같이 전기신호를 이용한 평가가 가능하다면 다양한 강화재의 분산상태를 평가할 수 있게 된다. 전압, 전류, 전기저항, 임피던스, 커패시턴스 등과 같은 다양한 전기신호가 존재하기 때문에 복합재료 내부의 분산상태를 분석하기 위한 방법으로 다양하게 연구될 수 있다. 본 연구의 핵심은 전도성이 없는 SiC 나노입자에 대한 분산도를 전기신호로 분석하는 것이 목적이다.

다양한 전기신호 중 커패시턴스(Capacitance)가 분산도 평가에 적용하기 용이하다 말할 수 있다. 커패시턴스가 의미하는 것은 측정 구간에 대한 전기용량을 의미한다. 커패시터(Capacitor)라 불리는 축전기의 전하 축적 정도를 분석하기 위해 사용된 전기적 신호이다[8]. 축전기의 내부에 존재하는 부도체의 전하량을 확인하는 단위인 커패시턴스라는 전기 신호는 고분자 재료의 경우 일반적으로 피코 단위로 측정된다. 하지만 SiC와 같은 무기질은 고분자 재료보다 높은 커패시턴스를 나타낸다. SiC/에폭시 복합 수지와 같은 경우 두 재료의 전하량이 합쳐지는 결과가 나타난다. 이

러한 원리를 바탕으로 일정 구간을 나눈 시편의 구간별 커패시턴스를 측정하여 재료에 대한 전하량을 평가하여 재료 내부의 분산도를 평가할 수 있도록 연구 내용을 구상하였다[9].

본 연구에서는 커패시턴스를 이용한 SiC/에폭시 복합 수지 내부의 분산도 예측방법에 대한 연구를 진행하였다. 나노입자에 대한 분산 방법을 다르게 하여 분산 상태를 다르게 하였다. 소니케이션 분산방법과 단순 교반 분산방법으로 에폭시 수지 내부에 나노 SiC 강화재를 혼합하였다. 각기 다른 분산방법으로 제조된 SiC/에폭시 복합 수지에 대해 커패시턴스 측정법을 이용한 분산도 평가방법을 실행하여 분산방법에 따른 SiC 분산도 차이를 비교분석하였다. SiC/에폭시 복합 수지에 대한 기계적 물성을 평가하여 나노입자에 의한 분산상태가 미치는 기계적 물성의 차이를 분석하고 파단면을 관찰하여 분산상태에 대한 결과를 분석하였다. 궁극적으로 커패시턴스와 기계적 강도와의 상관관계를 이해하고 커패시턴스 측정법을 이용한 분산도 평가방법에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 실험

2.1 재료

SiC/에폭시 복합 수지를 제조하기 위해서 기지 재료로 비스페놀 A 타입 범용 에폭시(YD-114, (주)국도화학, 한국)를 사용하고, 액상 경화제(KBH-1089)를 수지와 1:1로 혼합하여 기지재료로 사용하였다. 강화재로는 Fig. 1과 같이 나노 SiC(SiC Beta type, Nanostructure Amorforce Inc., 미국)를 사용하였다. SiC 입자의 직경은 55 nm이며, SiC 나노입자가 1 wt% 함유된 SiC/에폭시 복합 소재를 제조하였다.

SiC/에폭시 복합 재료의 분산방법을 다르게 설정하였다. 나노입자의 분산상태가 비교적 균일하게 나타난다는 소니케이션 방법과 동시에, 나노입자와 수지를 혼합 할 경우 입자의 불균일한 상태가 나타나기 쉬운 단순 교반 방법으로 시편을 제조하였다[10]. 소니케이션 방법은 SiC 나노입자와 에폭시 수지를 비커에 넣고 6시간 동안 소니케이션을 시킨 후 경화제와 혼합하여 실험용 시편을 제조하였다. 교반 분산방법의 경우 80 rpm 조건으로 마그네틱 바를 이용한 교반을 시도하였다. 에폭시 수지와 SiC 나노입자를 넣고 6시간 동안 교반한 뒤, 경화제와 혼합하여 시편을 제조하였다.

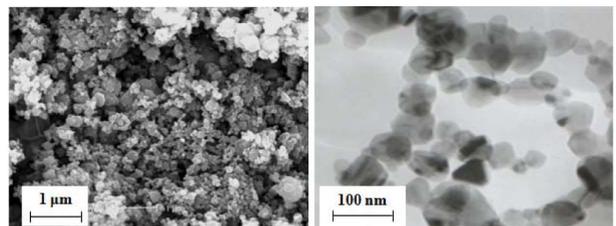


Fig. 1. FE-SEM and TEM of nano SiC powder



Fig. 2. Dispersion evaluation test system for nano-SiC/epoxy composites

2.2 커패시턴스를 이용한 분산도 평가 방법

Fig. 2는 분산도 평가를 위해 사용한 실험 장비와 시편에 대한 모식도를 나타낸다. 재료가 보유하고 있는 커패시턴스 전기신호를 측정하기 위해 LCR 미터(LCR-816, Instek Inc., 미국)를 이용하였다. 구간별 커패시턴스를 측정할 수 있도록 2 × 40 × 1 mm 크기의 직육면체 형태의 시편을 제조하였다. 6 mm 간격으로 구리선을 삽입하여 구간을 나누었다. 일반적으로 커패시턴스와 전하량에 대해서 설명한 전자공학 이론은 다음 식 (1)과 같다[11].

$$Q = C \cdot V \tag{1}$$

식 (1)에 Q는 전하량을 의미하며, C는 커패시턴스로 전기용량을 의미한다. V는 전압을 의미한다. 전하량을 확인하기 위해서 전압과 커패시턴스 결과가 필요하다. 커패시턴스 측정법을 이용한 분산도 예측방법은 전압을 고정시키고 평가하는 커패시턴스 결과를 확인하는 것이기에 전하량과 커패시턴스 결과는 비례관계라 할 수 있다. SiC/에폭시 복합 수지에 대한 내부 분산 상태에 따라 고분산 상태가 높은 커패시턴스 결과를 얻게 되는 이유를 설명하는 이론은 식 (2)와 Fig. 3으로 설명할 수 있다.

$$C_A = C_1 + C_2 + C_3 \dots + C_n \tag{2}$$

커패시턴스를 보유하는 축전기가 병렬로 이루어 질 경우 식 (2)와 같이 계산된다. 일반 고분자 수지에 SiC 나노입자를 함유할 경우 커패시턴스 측정 결과가 증가되는 이유를 설명하기 위해 식 (2)가 중요하다. 일반 고분자 수지가 SiC 나노입자가 함유될 경우, 커패시턴스의 변화를 설명하는 모델은 Fig. 3과 같다. 일반 에폭시 수지의 상태는 Fig. 3(a)의 결과와 같이 단순히 하나의 개체로 여길 수 있다. 도체/부도체/도체로 이루어진 것이 축전기이다. 에폭시 수지는 이때 부도체 부분이라고 생각할 수 있다. 하지만 SiC 나노입자를 에폭시 수지 내부에 보유함에 따라 전기 흐름에 방해가 일어난다. 축전기를 이루는 부도체 부분의 미세 구조가 문제된다. 도체로 이루어진 양극 부분에 전하가 축적되

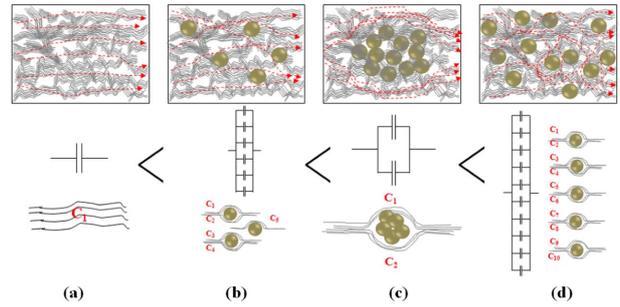


Fig. 3. Model for SiC dispersion condition of nano-SiC/epoxy composites: (a) neat epoxy, (b) A small amount of SiC/epoxy composites, (c) poor dispersion condition of SiC/epoxy composites, (d) Good dispersion condition of SiC/epoxy

는 정도를 재료 구조 변화가 문제된다. 비록 하나의 부도체 층을 이루고 있는 구간이지만 그 안의 상태는 SiC 나노입자 함유에 의해 나누어진 SiC 나노입자, 에폭시, SiC/에폭시 계면으로 세분화 되어 여러 종류의 축전기가 병렬로 연결된 상태가 된다. 즉 SiC/에폭시 복합 수지가 이루고 있는 SiC 나노입자, 에폭시, SiC/에폭시 계면의 발생으로 여러 축전기가 병렬로 배열되어 있다고 가정할 수 있다. 이러한 이유로 순수 에폭시 수지에 비해 SiC/에폭시 복합 수지의 경우 높은 커패시턴스가 측정된다.

에폭시 수지 내부에 SiC 나노입자가 존재함에 따른 커패시턴스 증가 가설과 동일하게 SiC 나노입자의 분산 상태를 거론할 수 있다. SiC 나노입자가 응집되어 하나의 큰 마이크로 입자처럼 될 경우 고분자 기지에 비해 SiC/에폭시 복합 수지의 커패시턴스 결과는 소폭 증가한다. 하지만 SiC 균일분산 상태에 따른 고분자 기지와 SiC 나노입자 간의 계면의 수가 증가함에 따라 부도체 층이 만드는 내부 축전기의 양이 증가하기 때문에 더 높은 커패시턴스 결과를 얻게 된다.

커패시턴스 측정법을 이용한 분산도 평가방법에 대한 정리를 하면, 에폭시 수지에 비해서 다른 나노입자를 함유할 경우 더 높은 커패시턴스를 얻게 된다. 그리고 동일한 양을 넣어도 분산 상태에 따른 커패시턴스 차이가 존재한다. SiC/에폭시 복합 수지 내부를 이루는 에폭시, SiC 나노입자, SiC/에폭시 계면이 있는데 균일 분산 상태일 경우 SiC/에폭시 계면이 증가됨에 따라 내부 커패시턴스가 높아지는 결과를 얻게 된다.

2.3 분산 방법이 다른 SiC/에폭시 복합 수지에 대한 인장강도 평가

커패시턴스 측정에 따른 분산도 평가 결과에 대한 타당성 여부를 확인하기 위해 분산방법이 다른 두 SiC/에폭시 복합 수지의 인장강도를 평가하였다. 인장 시편은 Fig. 4와 같다. 인장 실험을 하기 전에 20 mm의 간격을 두고 LCR 미

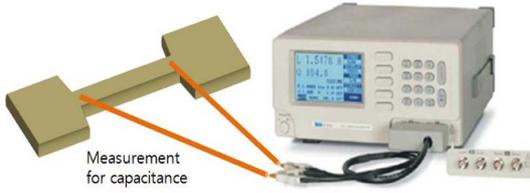


Fig. 4. Check for capacitance for tensile test specimen of nano SiC/epoxy composites

터를 이용하여 커패시턴스를 측정하였다. 커패시턴스는 전하량과 비례하며, 전하량은 내부 SiC 나노입자 함량과 상대적인 상관관계가 있는지 비교분석하기 위함이었다. 궁극적으로 커패시턴스와 인장강도 간의 상관관계를 비교하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 커패시턴스를 이용한 분산도 평가 결과

Fig. 5는 에폭시 수지에 대한 커패시턴스 결과를 정리한 것이다. 구간별로 에폭시 수지의 상태를 분석하였다. 비교적 안정적인 커패시턴스 상태를 보였다. Fig. 5와 같은 결과는 에폭시 수지만의 상태이기 때문에 가능한 것이다. 구간별 측정 결과가 대부분 동일한 커패시턴스로 나타나지 않은 이유는 고분자 내에서 고분자 사슬의 엉킴 정도가 다르기 때문이다. 이러한 차이는 미미한 차이이기 때문에 무시할 수 있다.

Fig. 6은 에폭시 수지 중간에만 SiC 나노입자를 삽입했는 시편의 커패시턴스를 측정한 결과이다. SiC 나노입자를 함유할수록 커패시턴스가 증가되는 가설이 맞는지 검증하기 위해 실험한 결과이다. 시편을 9구간으로 나누어 정밀하게 커패시턴스 결과를 비교분석을 하였다. SiC 나노입자가 다량으로 존재하는 구간에는 에폭시 수지만 존재하는 부분에 비해 높은 커패시턴스 결과를 확인하였다. SiC 나노입자가 함유된 구간에서 에폭시의 전하량뿐만 아니라 SiC 나

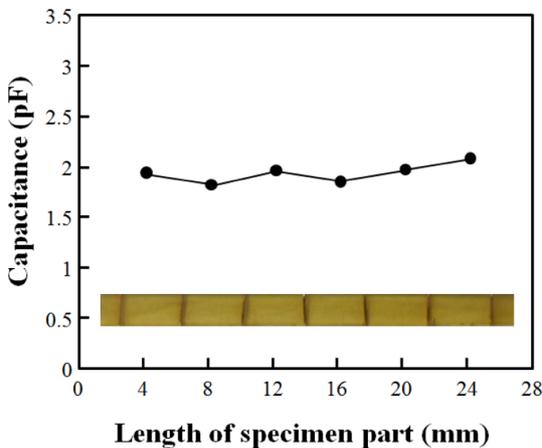


Fig. 5. Capacitance of epoxy resin for each section

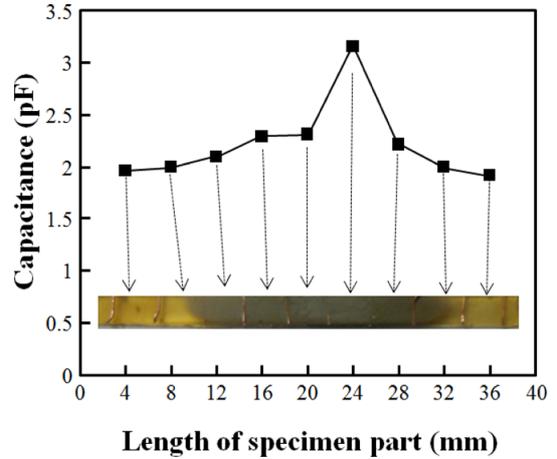


Fig. 6. Capacitance of nano-SiC/epoxy composite for each section

노입자의 전하량까지 합쳐지기 때문에 발생하는 결과이다. 에폭시 수지, SiC 나노입자, SiC/에폭시 계면에 의한 영향으로 커패시턴스가 증가되었다.

3.2 커패시턴스를 이용한 분산도 분석 결과 검증

Fig. 7과 8은 소니케이션 분산방법과 교반기 분산방법을 이용한 SiC/에폭시 복합수지에 대한 구간별 커패시턴스 결과를 분석한 결과이다. 동일 조건의 시편 3개를 제조하여 커패시턴스 결과를 평균과 편차 결과로 정리한 결과이다. 육안으로 평가가 가능할 정도로 구간별 커패시턴스 결과에 차이가 존재하였다. Fig. 7의 경우, 소니케이션 분산방법을 이용한 결과이며, 비교적 편차가 소폭으로 존재하며, 구간별 커패시턴스의 결과가 선형으로 유지되는 결과를 확인하였다. 그에 비해 Fig. 8의 경우, 교반기 분산 방법을 이용한 경우의 시편은 편차도 크고 구간별 커패시턴스의 결과가 불안정하게 확보되었다.

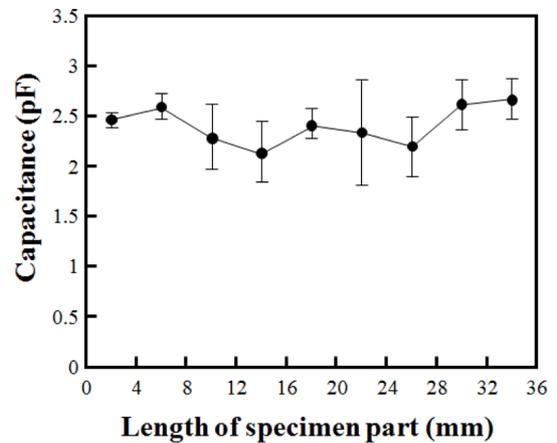


Fig. 7. Capacitance of nano SiC epoxy composites for each section (Dispersion method: Sonication method)

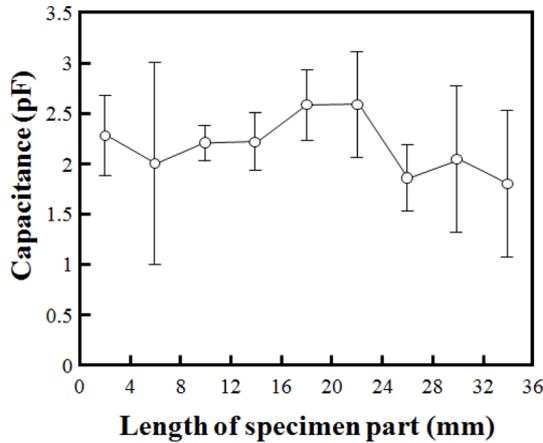


Fig. 8. Capacitance of nano SiC epoxy composites for each section (Dispersion method: Stirrer method)

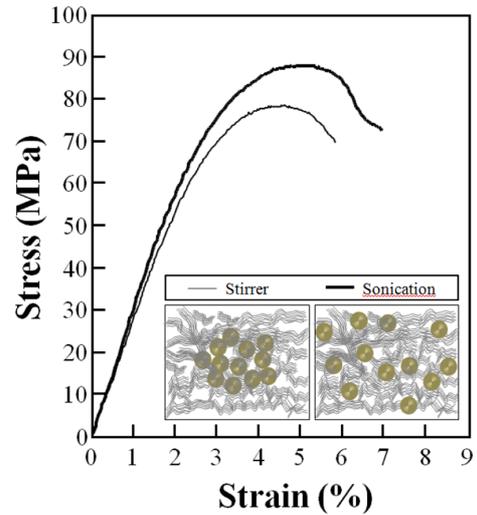


Fig. 10. Comparison of reinforced effect for nano SiC of nano SiC epoxy composites with different dispersion methods

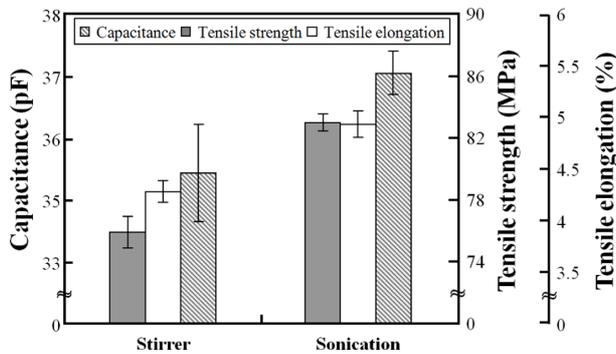


Fig. 9. Tensile test of nano SiC epoxy composites for different dispersion methods

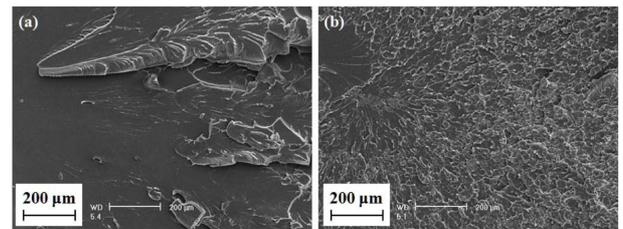


Fig. 11. FE-SEM of fracture surface of nano SiC epoxy composites with dispersion methods; (a) Stirrer, (b) Sonication

Fig. 9는 각기 다른 분산 방법을 이용하여 인장 시편을 만들어서 인장강도를 평가한 결과이다. 일반적으로 YD-114/KBH-1089 에폭시 배합은 60 MPa 정도의 인장 강도를 가진다. Fig. 9를 바탕으로 볼 때 SiC 나노입자 함유에 따른 강도 증가 효과가 확인된다. 소니케이션 방법을 이용할 경우, 교반기를 이용하는 경우보다 더 큰 강도 증가를 확인하였다. 이는 SiC 나노입자에 대한 분산 효과에 대한 차이로 설명할 수 있다. 소니케이션 분산방법을 이용할 경우 초음파에 의해 나노입자 간의 응집을 방해하는 과정을 가진다. 입자와 입자간 응집되는 정도를 최소화하여 에폭시 수지 내부에 강화재로서 균일하게 분산된 상태이기 때문에 강도 증가의 효과가 존재하였다. 하지만 교반기를 이용한 분산방법을 이용할 경우 마그네틱 교반에 의한 회전력이 SiC 나노입자와 고분자 기지의 혼합을 시도하지만, SiC 나노입자간 응집을 강하게 파쇄하기 어렵기 때문에 고분자 기지 내부에서 SiC 나노입자 간 응집 발생되어 강화재 효과를 반감시키게 되었다.

이러한 이유를 보충하기 위해 Fig. 10과 Fig. 11을 통하여 설명할 수 있다. 분산방법이 다른 SiC/에폭시 복합 수지에

대한 실제 인장실험 결과를 비교하고 파단면을 FE-SEM으로 확인한 결과이다. SiC 나노입자를 함유함으로써 재료 자체의 파괴 단계시 관찰되는 파괴 지연 효과를 확인할 수 있다. SiC 나노입자를 분산한 방법의 차이에 의해 SiC 강화재의 장점인 파괴 지연 효과가 존재함을 확인하였다. SiC 나노입자가 비교적 균일하게 고분자 기지내부에 분산되었다면, 재료 파괴단계를 지연시켜 준다. 하지만 분산도가 균일하지 못한 상태라면 SiC 강화재를 활용하더라도 파괴 지연 효과는 반감된다. 기계적인 물성 평가 결과를 통해서 분산도의 차이를 분석해 볼 경우 소니케이션 방법이 더 효과적인 것을 방법임을 확인할 수 있었다.

파단면의 사진 결과로 분산도를 비교할 수 있다. Fig. 11 (a)와 (b)의 차이가 존재하였다. 분명 두 재료는 동일한 에폭시 수지에 SiC 나노입자를 분산시킨 재료이다. 하지만 파단면의 차이가 명확히 발생되었다. 이는 SiC 나노입자가 고르게 분산되었기 때문이라고 말할 수 있다.

마지막으로, Fig. 9을 통하여 인장 강도와 커패시턴스 결과는 상관관계를 가진다는 점을 확인할 수 있었다. 동일한 양의 SiC 나노입자를 함유하였기 때문에 분산방법이 다른 두 인장 시편들에 대한 커패시턴스 결과는 비교적 동일하

지만, 소니케이션을 이용한 방법이 더 큰 커패시턴스를 나타내었다. 이는 에폭시 수지 내부에 존재하는 SiC 강화재의 분산 상태가 균일하기 때문에 동일 양으로 제조된 시편이라 하여도 평균값에 차이가 존재하는 것이다. 비교적 커패시턴스 결과가 증가되면 기계적 강도도 증가된다는 점을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SiC/에폭시 복합 수지를 제조할 경우 SiC 나노입자의 분산도를 예측하는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 분산도의 변화를 주기 위해 비교적 안정적인 분산 방법인 소니케이션 분산방법과 입자 분산시 비교적 불균일한 교반기 분산방법으로 2가지 나노입자 분산방법을 선정하였다. 분산 방법이 다른 차이를 두고 고분자 기지 내부에 SiC 분산 상태를 커패시턴스 결과로 평가하였다. SiC/에폭시 복합 소재를 막대 형태의 시편으로 제조하고, 내부 구간을 설정하여 구간별 커패시턴스 값을 관찰하였다. 구간별 커패시턴스 값에 대해 평균을 구하고, 구간별 결과에 대한 편차를 비교하여 분산 방법에 따른 차이를 둔 2종류의 SiC/에폭시 복합 수지 내부의 분산상태를 비교하였다. 구간별 커패시턴스 측정 결과를 바탕으로 소니케이션 분산 방법이 교반기 분산방법보다 균일한 SiC 나노입자 분산상태를 가짐을 확인하였다. 균일한 분산 상태인 소니케이션 분산방법의 경우 구간별 커패시턴스 결과가 대부분 선형으로 측정되며, 구간별 편차 역시 낮게 관찰되었다. 커패시턴스를 이용한 분산도 예측 방법의 타당성을 검증하기 위해 분산방법이 다른 두 재료를 인장 강도를 비교하였다. 기계적 물성 평가 역시 구간별 커패시턴스 결과가 높았던 소니케이션 분산방법으로 제조한 시편의 인장 강도가 교반기 분산방법에 비해 높게 나타났다. 이는 SiC 나노입자 분산 상태가 균일하였기 때문에 나노입자 강화 효과인 파괴단계의 지연 효과가 크게 향상된 결과를 관찰할 수 있었다. 부가적으로 재료의 강도와 커패시턴스 간의 상관관계가 비례관계를 확인하였다.

후 기

본 연구는 “산업통상자원부”, “한국산업기술진흥원”, “동남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”(2013-0679)으로 수행된 연구 결과입니다. 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. Starov, V.M., *Nanoscience Colloidal and Interfacial Aspects*, CRC Press Taylor & Francis Group, Surfactant Science Series Volumes, U.S.A., 2009.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Park, J.M., Jang, J.H., Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Lee, W.I., Park, J.G., and DeVires, K.L., “Dispersion and Related Properties of Acid-Treated Carbon Nanotube/Epoxy Composites using Electro-Micromechanical, Surface Wetting and Single Carbon Fiber Sensor Tests,” *Advanced Composite Materials*, Vol. 20, 2011, pp. 337-360.
6. 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.
7. 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, No. 5, 2009, pp. 8-14.
8. Brindley, K., *Starting Electronics, 3d ed*, Oxford, Newnes, UK, 2004.
9. Slone, G.R., *TAB Electronics Guide to Understanding Electricity and Electronics, 2d ed*, McGraw-Hill, U.S.A., 2000.
10. Park, J.M., Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., and DeVires, K.L., “Effect of Thermal Treatment Temperatures on the Reinforcing and Interfacial Properties of Recycled Carbon Fiber-Phenolic Composites,” *Composites: Part A*, Vol. 47, 2013, pp. 156-164.
11. Horn, D.T., *Basic Electronics Theory with Projects and Experiments*, 4th ed, McGraw-Hill, U.S.A., 1994.