

# 산화그래핀 첨가에 따른 에폭시 나노 복합재료의 열적 및 기계적 특성 연구

## Study on Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Resin Nanocomposites with the Graphene Oxide

### \*Corresponding author

Sung-min Park  
(maxwell02@dyetec.or.kr)

심지현, 유성훈, 이종혁, 김근수<sup>1</sup>, 천진성<sup>1</sup>, 박성민\*

다이텍연구원, <sup>1</sup>(주)티포엘

**Ji-hyun Sim, Seong-hun Yu, Jong-hyuk Lee, Gun-soo Kim<sup>1</sup>, Jin-sung Chon<sup>1</sup> and Sung-min Park\***

*Korea Dyeing and Finishing Technology Institute(DYETEC), Daegu, Korea*

*<sup>1</sup>Department of Composite Materials R&D Center, Textile for Life(T4L), Gyeongsan, Korea*

Received\_June 05, 2018

Revised\_June 21, 2018

Accepted\_June 24, 2018

### Textile Coloration and Finishing

TCF 30-2/2018-6/98-106

©2018 The Korean Society of Dyers and Finishers

**Abstract** In this study, graphene oxide(GO) was synthesized by using Hummer's method. Then, GO was used as a additive for epoxy resin nanocomposites that were prepared by mixing Tetraglycidyl diamino diphenyl methane(TGDDM) and hardner(M-DEA+M-MIPA). Thermal and mechanical properties of epoxy resin nanocomposites were confirmed by analytical methods such as TG-DTA, DMA, fracture toughness, tensile strength, and flexural strength. The fracture surfaces of epoxy resin nanocomposites with different content of the GO were observed by a Scanning Electron Microscope(SEM). The mechanism for mechanical properties of epoxy resin nanocomposites was analyzed by modeling of nanocomposites with different GO weight. Due to the GO, both the heat resistance and the glass transition temperature of the epoxy resin nanocomposites were improved. Interestingly, when 0.1wt.% of GO was added to the epoxy resin/hardner mixture, the properties of mechanical increased compared with the neat epoxy resin. This results were caused by an aggregation between the GO.

**Keywords** TGDDM, graphen oxide, epoxy resin nanocomposites, heat resistance, fracture toughness, aggregation

## 1. 서 론

에폭시 수지는 가장 일반적인 열경화성 수지로 발열·경화 반응에 의해 3차원의 가교결합 네트워크 구조를 갖는 형태를 가진다<sup>1,2</sup>. 에폭시 수지는 뛰어난 접착성, 내화학성, 내열성 및 기계적 특성 때문에 자동차, 우주·항공, 건설 및 전자산업과 같은 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다<sup>3,4</sup>. 또한 novolac, phenoxy 수지 및 고무와 비슷한 구조를 지닌 에폭시 수지 등 기능성을 위해 구조가 변환된 수지도 요구되고 있을 뿐만 아니라, 에폭시 수지의 특성을 향상시키기 위하여 탄소 나노튜브 및 그래핀과 같은 필러들이 사용되고 있는 실

정이다. 그 중에 그래핀(Graphene)은 탄소 원자들이 벌집 모양으로 연결된 얇은 막 구조로 원자 수준의 두께와 2차원 판상형 구조로 인하여 독특한 물리적 특성을 가지고 있으며 탄소나노튜브와 달리 흑연에서 얻어 낼 수 있다. 또한 그래핀은 탄소나노튜브와 더불어 수많은 연구의 대상이 되고 있다<sup>5,6</sup>.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 그래핀 기반 물질은 배열 조작 및 유기/무기물 기지재에서 분자간 인력(van der Waals force)으로 인한 응집(agglomeration) 현상에 의한 분산의 어려움으로 여전히 많은 연구가 필요한 상황이다<sup>7-9</sup>.

에폭시 나노 복합재를 만들기 위해 필러로 사용되는

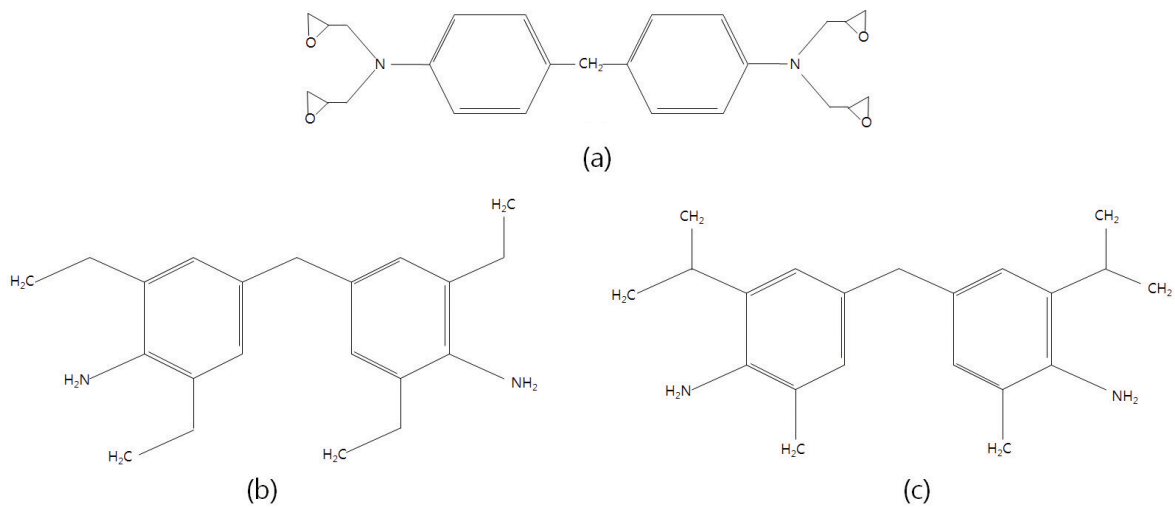


Figure 1. Chemical structural of (a) TGDDM, (b) M-DEA, (c) M-MIPA.

carbon black, carbon nanotubes, carbon nanofibers, graphene과 같은 탄소 나노재료의 사용은 그들의 독특한 특성에 기인하여 주목을 받고 있다. 이러한 나노재료 중 graphene oxide(GO)는 그래핀의 표면을 기능화한 것으로, 분자간 인력으로 인하여 응집현상이 발생하는 그래핀을 사용한 고분자 나노 복합재료 보다, 유리전이온도나 파괴인성 등 열적·기계적 특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다<sup>10,11</sup>.

본 연구에서는 고내열 특성을 가지고 있는 에폭시 수지인 Tetraglycidyl diamino diphenyl methane (TGDDM), 그리고 이 에폭시 수지의 열적·기계적 성질을 효율적으로 높일 수 있는 경화제(M-DEA+M-MIPA)를 사용하였다. 열적·기계적 성질을 향상시키기 위하여 neat 에폭시 수지에 GO의 질량분율을 각각 다르게 첨가하여 에폭시 나노 복합재료를 제조하였고, 열역학적·기계적 특성 분석을 통하여 GO가 neat 에폭시 수지에 첨가되었을 때, GO의 질량분율에 따른 에폭시 나노 복합재료의 특성을 분석하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

흑연 분말(graphite powder, average particle size <math>30\ \mu\text{m}</math>, Sigma-Aldrich, USA)과 과망간산칼륨(potassium permanganate,  $\text{KMnO}_4$ , Sigma-Aldrich, USA), 황산(sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 98%, Daejung Chemical, Korea), 과산화수소(hydrogen

peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; 30% in water, Daejung Chemical, Korea) 및 염산(hydrochloric acid,  $\text{HCl}$ ; 35% in water, Daejung Chemical, Korea)이 그래핀 옥사이드(graphene oxide, GO)합성에 사용되었다. 또한, 에폭시 수지로 Tetraglycidyl diamino diphenyl methane(TGDDM, Kukdo Chemical, Korea)가 사용되었고, 경화제(M-DEA+M-MIPA, Lonza, Switzerland)와 에폭시 수지의 화학구조는 Figure 1에 나타내었다.

### 2.2 GO의 합성

GO는 변형된 Hummer's 방법<sup>12,13</sup>을 이용하여 합성되었으며, 합성과정의 모식도를 Figure 2에 나타내었다. 우선 98%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  80mL를 둥근바닥 플라스크에서 0°C로 냉각시킨 후, graphite powder 2g를 플라스크에 넣고 혼합될 때까지 교반시킨다.  $\text{KMnO}_4$  10g을 차가운 graphite용액에 천천히 혼합하고, 생성된 혼합물은 0°C로 유지한다. 혼합물을 얼음 조로 옮겨 담아서 35°C 6시간 동안 교반시킨다. 증류수 0.5L를 천천히 혼합하고 난 뒤에 2시간 더 교반시켜준다. 그 후, 증류수 1.5L을 천천히 첨가시킨 뒤 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  30mL을 적하시켰다. 혼합물은 3일 동안 그대로 두어 침전시킨 후에 맑은 액은 따라내었다. 침전물을 증류수에 차례 세척하고, 뒤이어 잔류하고 있는 metal oxide를 제거하기 위해서, 20mL의  $\text{HCl}$ 용액으로 5회 이상 원심분리한다. 맑은 상등액은 분당 10000회의 회전속도로 30분동안 원심분리에 의해 제거된다. 동결건조 후,

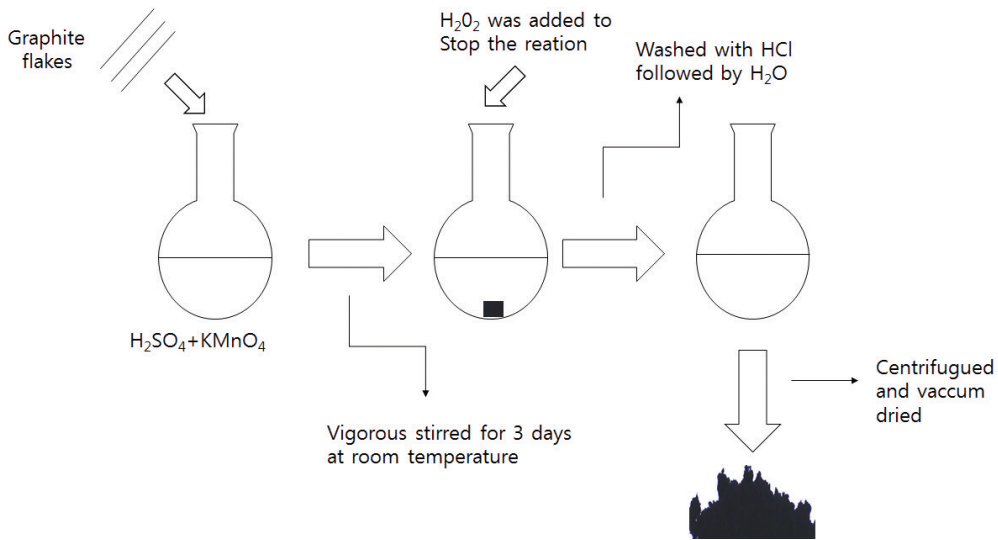


Figure 2. Illustration of procedure for synthesis of graphene oxide(GO).

진갈색의 GO powder를 얻어내었다.

2.3 에폭시 나노 복합재료의 제조 및 특성 분석

에폭시 나노 복합재료를 제조하기 위한 경화제는 화학양론적으로 양을 계산하였다. 에폭시 수지와 경화제의 화학양론적인 양은 한 개의 N-H그룹이 하나의 epoxide 그룹과 반응하기 때문에 식(1)을 따라 계산되었다.

$$E = (AHEW \times C / EEW) \dots\dots\dots (1)$$

where,

E : Stoichiometric amounts of the epoxy resin

C : Stoichiometric amounts of the curing agent

AHEW : An amine hydrogen equivalent weight, g/eq

EEW : Epoxide equivalent weight, g/eq

Table 1. Equivalent weight of GO at a epoxy resin nanocomposites

Content of GO(wt.%)	Equivalent weight of GO(g)
0	0.000
0.1	0.208
0.3	0.626
0.5	1.043
1	2.086

에폭시 수지와 경화제의 화학적당량은 각각 131 g/eq와 77.6g/eq로 확인하였고, 이에 따른 GO의 질량분율에 따른 화학당량을 Table 1에 나타내었다. 에폭시 나노 복합재료에서의 GO의 함량은 에폭시 수지와 경화제의 전체 양을 기준으로 계산되었다. 에폭시 수지/경화제/GO 제조시 GO는 각각 0.1wt.%, 0.3wt.% 및 0.5wt.%의 질량분율로 혼합하였다. 에폭시 나노 복합재료를 제조하기 위하여 GO와 에폭시 수지를 혼합기(MJ Research, Korea)를 사용하여 2000rpm의 속도로 10분동안 교반한 후, 경화제를 에폭시 수지와 GO의 혼합물에 첨가하여 155℃에서 20분 동안 교반하였다. 그리고 진공상태에 두어 기포를 제거하고 몰드에 부었다. 경화과정에서 발생하는 기포를 최소화하기 위하여, 170℃에서 4시간동안 가경화과정을 거친 뒤에, 230℃에서 다시 2시간동안 완전경화를 하였다.

GO의 첨가에 따른 에폭시 수지/GO 혼합물의 열분해 특성을 알아보기 위하여 시차열 열중량 동시측정장치(TG-DTA, TA Q50, TA Instrument, USA)를 진행하였다. TG-DTA는 분당 10℃의 승온 속도로 800℃까지 승온하였고, 질소 가스 흐름 하에 실시하였다. 에폭시 수지/GO 혼합물은 혼합기를 사용하여 2000rpm의 속도로 10분동안 교반한 후, 진공상태에 두어 기포를 제거한 뒤에 특성 분석을 진행하였다.

제조된 에폭시 나노 복합재료의 GO의 질량분율에 따른 열역학적 특성을 분석하기 위하여 동적기계분석기(DMA, Q800, TA Instrument, USA)를 사용하였

다. DMA 스캔 온도 범위는 30°C~260°C이며, 스캔속도는 3°C/min로 설정하였다.

## 2.4 기계적 특성 분석

에폭시 나노 복합재료의 파괴인성시험은 ASTM E1820에 따라 두께 2.5mm의 CT(compact tension) 시편을 GO의 질량분율에 따라 5개씩 제작하였으며, 하중비 0.3으로 피로 예비 균열을 삽입하여 초기 균열 길이를 정하였다.

파괴인성시험은 상온에서 1mm/min의 속도로 진행하였다. 그리고 GO의 질량분율에 따른 파단면의 형상을 관찰하기 위하여 SEM(SU8220, Hitachi, Japan)을 사용하였다.

Neat 에폭시 수지와 GO 에폭시 나노복합재의 인장강도와 굽힘강도 및 충격강도를 측정하기 위하여 만능재료시험기(AG-250kNX, SHIMADZU, Japan)와 충격강도시험기(IT504, TINIUS-OLSEN, Korea)장비를 이용하였다. Neat 에폭시 수지와 GO의 질량분율이 서로 다른 에폭시 나노 복합재료의 기계적 특성을 비교하여, GO가 에폭시 수지에 혼합됨으로써 에폭시 수지의 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

에폭시 수지 나노 복합재료의 인장강도와 굽힘강도 측정은 각각 ASTM D638과 ASTM D790에 따라 진행하였다. 인장시편의 두께를 2mm로 설정함에 따라 시편의 형상을 type V에 맞추어 제작하였고 하중속도는 1mm/min로 인장시험을 실시하였다. 굽힘시험의 경우 지지대 간격과 두께의 비율(support-to-span depth

ratio)은 32:1로 설정하였으며, 하중 속도는 2mm/min로 설정하였다. 충격시험의 시편은 ASTM D256에 따라 폭 12.7mm, 길이 80mm, 두께 10mm로 제작되었고  $\nabla$ 자 형태의 홈을 주어 시험을 진행하였다. GO의 질량 분율마다 각각 5개의 시편을 제작하였고, 각 시편들의 평균값을 활용하여 결과를 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열역학적 특성 분석 결과

Figure 3에서 질소대기 하에 neat 에폭시 수지와 에폭시 수지/GO의 TG-DTA곡선을 나타내었다. Neat 에폭시 수지의 TG-DTA의 곡선의 경우, 약 290°C부근에서 열분해가 시작되어 주요 무게 감소 peak는 약 390°C부근에서 나타났다. GO의 질량분율에 따른 TG-DTA곡선을 비교해볼 때, neat 에폭시 수지에 GO가 첨가됨에 따라, GO가 가지고 열분해 온도가 전체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. GO를 사용한 에폭시 나노 복합재료는 열적성질이 향상되는 것으로 알려져 있다<sup>11)</sup>.

GO의 질량분율이 각각 0.5wt.%, 1.0wt.%인 TG-DTA 곡선을 비교해볼 때, 열분해온도가 소폭 증가하였다. 이는 0.5wt.%이상의 GO가 에폭시 나노복합재료에 첨가되었을 때, GO사이의 응집현상으로 인하여 열분해 온도가 효율적으로 증가하지 않은 것으로 보인다.

DMA 측정을 통해, 에폭시 나노 복합재료의 저장탄성률과  $\tan \delta$ 를 각각 Figure 4의 a와 b에 나타냈다.

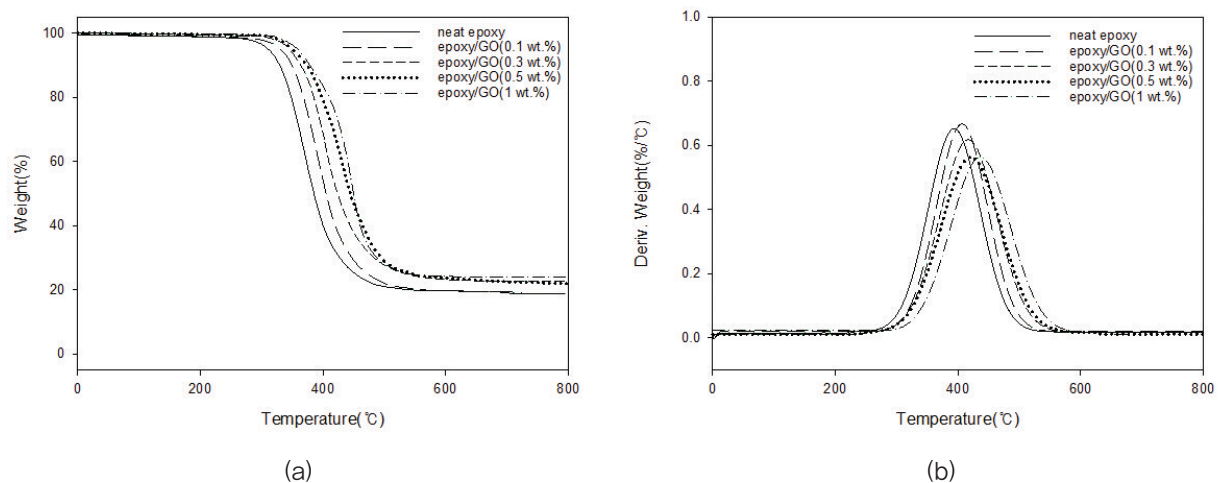
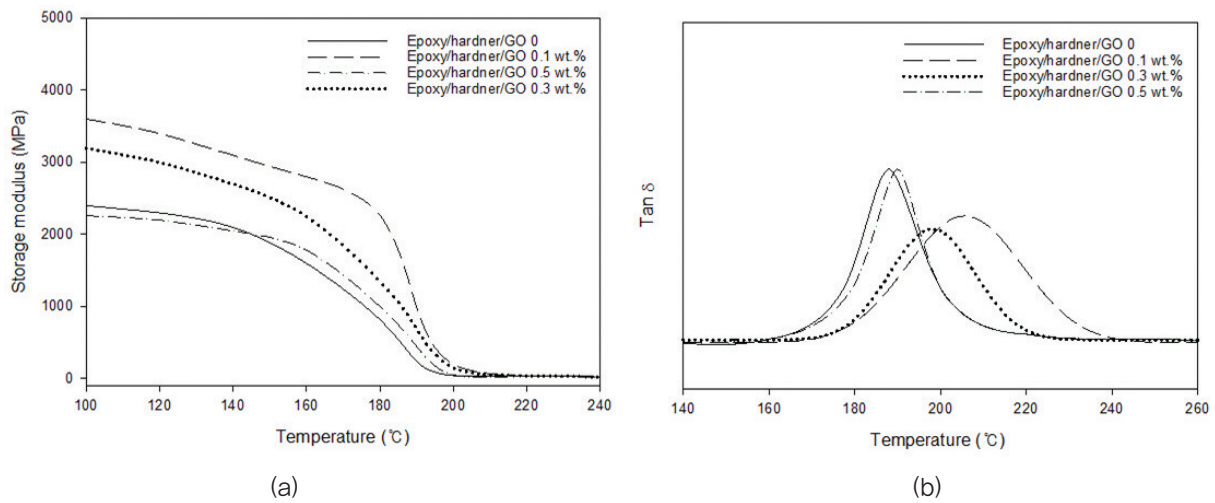


Figure 3. (a) TG-DTA and (b) derivative curves of epoxy/GO during heating up to 800°C under a N<sub>2</sub> atmosphere.

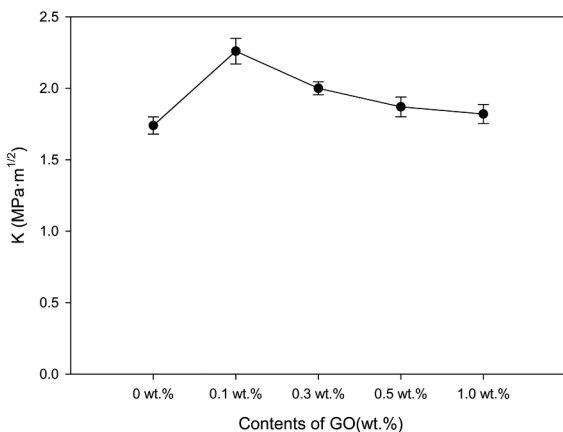


**Figure 4.** DMA results of epoxy/hardener/GO nanocomposites (a) storage modulus and (b)  $\tan \delta$  of the epoxy/hardener/GO nanocomposites. Samples were tested in the temperature range of 30 to 260°C at a scanning rate of 3°C/min.

저장탄성계수와 고무영역의  $\tan \delta$  결과값들을 볼 때, neat 에폭시 수지에 GO가 첨가되었을 경우에 전체적으로 향상된 값을 나타내었다. 이러한 결과는 GO의 첨가에 따라 에폭시 나노 복합재료의 유리전이온도가 향상되었음을 나타내며, 이는 에폭시 나노 복합재료의 가교밀도의 증가 때문인 것으로 보인다<sup>14)</sup>.

**3.2 파괴인성 분석 및 파단면 관찰**

Neat 에폭시 수지와 에폭시 나노 복합재료의 파괴인성 시험결과를 Figure 5에 나타내었다. 파괴인성 시험시 파괴인성값(fracture toughness, K)을 도출하기 위하여 ASTM E1802에서 제시하고 있는 다음의 식(2)



**Figure 5.** Result of fracture toughness of epoxy resin nanocomposites.

과 식(3)을 이용하였다<sup>15,16)</sup>.

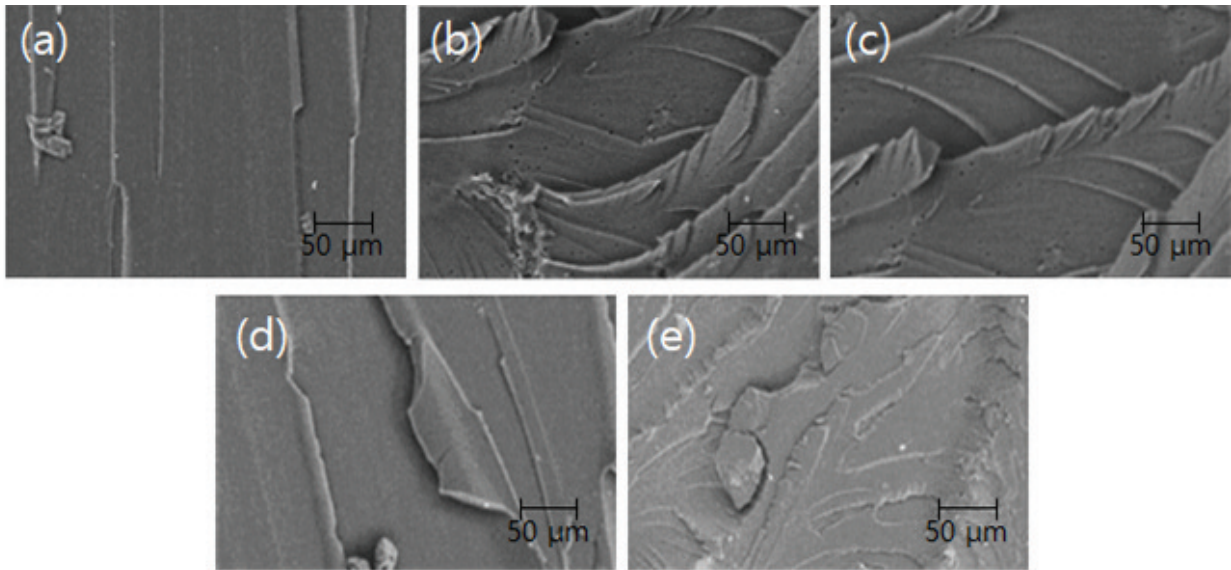
$$K = P_{max} / (B\sqrt{W}) f(a_0/W) \dots\dots\dots (2)$$

$$f(a_0/W) = \frac{2 + \frac{a_0}{W}}{(1 - \frac{a_0}{W})^{3/2}} [0.866 + 4.64(\frac{a_0}{W}) - 13.32(\frac{a_0}{W})^2 + 14.72(\frac{a_0}{W})^3 - 5.60(\frac{a_0}{W})^4] \dots\dots (3)$$

where,

- P<sub>max</sub> : Max. fracture load, N
- B : Depth of specimen, mm
- a<sub>0</sub> : Initial crack length, mm
- W : Width of specimen, mm

위 식에서 초기 균열 길이와 시편의 두께를 대입하여 파괴인성값을 구하였다. 그 결과, GO가 neat 에폭시 수지에 첨가됨에 따라 파괴인성값이 향상되는 결과를 나타내었다. Neat 에폭시 수지를 제외하고 GO의 질량분율별로 파괴인성 결과값들을 비교해볼 때, DMA 측정 결과와 마찬가지로 GO의 질량분율이 0.5wt.%~1.0wt.%일 때 낮은 값을 나타내었다. 이를 통하여 neat 에폭시 수지에 첨가되는 GO의 질량분율이 0.5wt.%인 경우에 GO사이의 응집현상 발생으로 인하여 에폭시 나노 복합재료의 가교밀도를 감소시켜, 고



**Figure 6.** Fracture surface of epoxy resin nanocomposites with different content of GO (a) neat epoxy, (b) 0.1 wt.%, (c) 0.3wt.%, (d) 0.5wt.%, (e) 1wt.%.

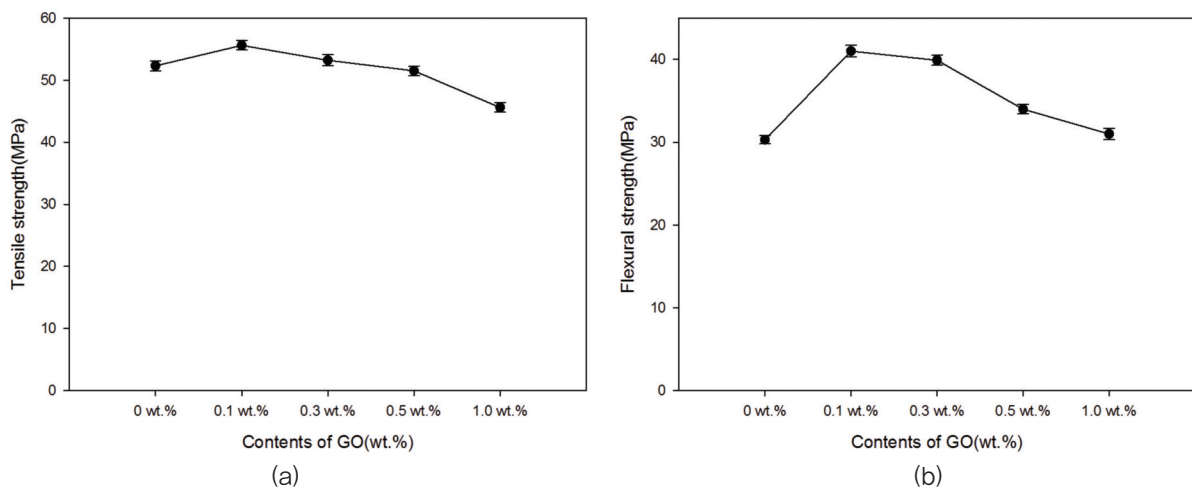
분자 사슬 분자사이의 계면 결합력을 저하시키는 작용을 함에 따라 기계적 계면특성을 감소시키는 것을 확인하였다<sup>17)</sup>.

파괴인성 측정을 진행한 후, 파단면에서의 균열 확장 모습을 관찰한 결과를 Figure 6에 나타내었다. Neat 에폭시 수지의 경우 파단면에 발생된 균열의 형상이 단조롭고 균열의 발생 빈도가 낮음을 확인할 수 있다. 이는 재료가 파단될 때 발생하는 균열의 정도가 크게 진행됨을 예상할 수 있고, 파괴에 대한 안정성이 낮은 상태를 나타낸다. 그에 비해 GO의 질량분율이 0.1wt.%일 경우, 파단면에 관찰되는 균열의 형상이

매우 거친 것을 확인하였다. 이는 파괴인성시험을 진행할 때, 에폭시 수지에 첨가된 GO가 파단시 받는 에너지를 흡수하여 균열의 발생 빈도가 높아지기 때문에 표면이 거칠게 된 것이라고 판단된다. GO의 0.5wt.% 이상일 때, GO의 응집 현상으로 인하여 파단면 균열의 발생 빈도가 낮아지는 경향을 확인하였다.

### 3.3 기계적 특성 분석

에폭시 나노 복합재료의 인장강도와 굽힘강도는 UTM을 이용한 인장 및 굽힘시험에 의해 측정되었고, 이 분석 결과는 Figure 7에 나타내었다.



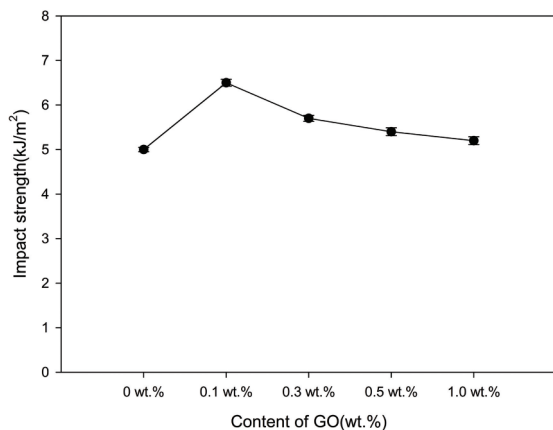
**Figure 7.** Result of (a) tensile strength and (b) flexural strength of epoxy resin nanocomposites.

**Table 2.** Mechanical properties of epoxy resin nanocomposites

Contents of GO(wt.%)	Tensile strength(MPa)	Flexural strength(MPa)	Impact strength(kN/m <sup>2</sup> )
0	52.3	30.3	5.1
0.1	55.6	41.0	6.5
0.3	53.2	38.1	5.7
0.5	51.5	34.2	5.4
1	45.6	30.8	5.2

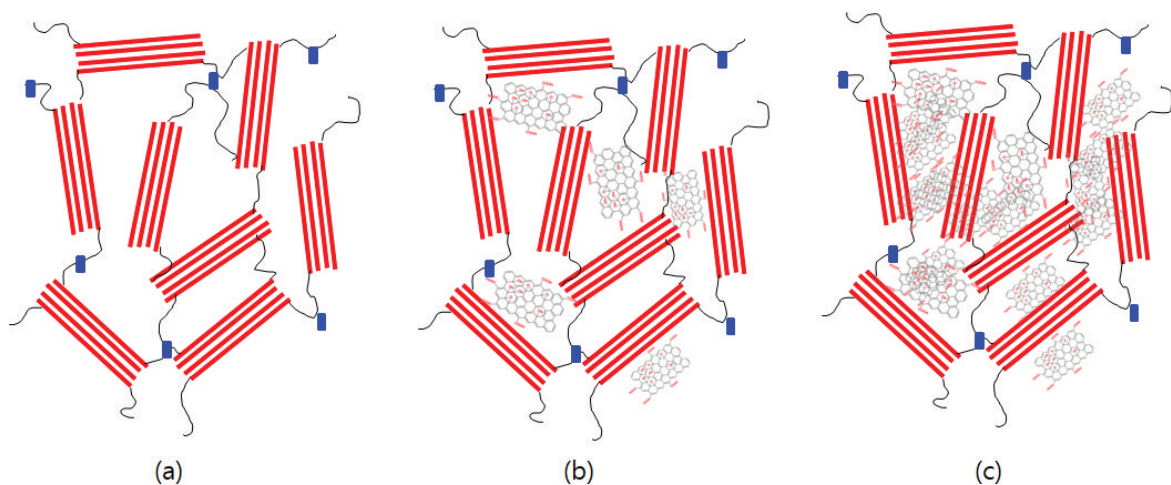
Neat 에폭시 수지의 굽힘강도 값은 30.3MPa를 나타내었고, 0.1wt.%와 0.3wt.% 조건에서 에폭시 나노 복합재료의 굽힘강도 값이 높게 나타나는 경향을 나타내었다.

Figure 8은 Izod 충격시험에 따른 에폭시 나노 복합재료의 충격강도를 GO의 질량분율에 따라 정리한 결

**Figure 8.** Result of Impact strength of epoxy resin nanocomposites.

과이다. GO의 첨가에 따라 충격강도는 neat 에폭시 수지에 비해 증가된 결과를 확인할 수 있었다. 이것은 GO가 에폭시 수지에 첨가됨으로 인해, GO가 가지고 있는 기계적 성질로 인하여 에폭시 나노 복합재료의 기계적 특성이 향상된 것으로 보인다<sup>10</sup>. GO의 질량분율이 각각 0.1wt.%, 0.3wt.%일 때의 충격강도 값을 비교해볼 때, 0.1wt.%의 질량분율에서 가장 높은 충격강도 값을 나타냄을 확인하였다. 에폭시 나노 복합재료의 인장강도와 굽힘강도 및 충격강도 결과값들을 Table 2에 정리하였다.

Figure 9에 에폭시 나노 복합재료의 특성이 GO의 질량분율이 0.1wt.%인 조건에서 최적의 결과값을 나타내는 현상에 대한 근거를 제시하였다. 일반적으로 에폭시 수지는 소재의 안정성과 에폭시 사슬의 안정적인 화학구조를 형성하기 위해 free volume을 보유한 상태로 경화가 된다. 따라서 Figure 9(a)와 같이 주사슬과 경화제를 제외한 구간에서 빈 공간을 형성한 상태로 유지된다. GO의 경우 흑연에서 제조한 나노 사이즈의 입자이기 때문에 에폭시 주사슬과 수산화기를 이용한

**Figure 9.** Modeling of epoxy resin nanocomposites with different GO wt. % (a) neat epoxy, (b) 0.1 wt. %, (c) 1 wt. %.

반응으로 연결이 될 수 있으나, 경화단계에서 발생하는 열에 의해 고분자 사슬의 사이사이에 입자가 물리적으로 존재하게 되는 경향이 있다. 일정한 에폭시 사슬의 free volume에 적합한 GO의 크기 및 입자의 양이 투여되어야 고분자 사슬의 안정성을 방해하지 않게되며, 고분자 사슬이 강한 힘을 받더라도 GO 입자가 대부분 응력을 완화시켜주어 GO 에폭시 나노복합재료의 파괴인성 및 기계적 강도가 높아지는 결과를 초래하게 만든다. 하지만 Figure 9(c)의 결과를 보면 GO가 빈 공간에 다량 존재하게 되며, 이 과정에서 GO는 고분자 사슬보다 더 높은 힘을 가지기 때문에 응력집중을 받게되며, 고분자사슬은 단순히 GO의 응집을 보유한 채, 본래의 힘보다 낮은 기계적 특성을 가지게 된다. GO의 질량분율 증가에 따라 나노복합재료의 특성이 저하되게 되는 것이며, GO는 고분자 사슬에 비해 강직성이 높기 때문에 파괴나 인장응력에 안정적이지 못하고 나노복합재료의 구조자체가 파괴되는 결과를 초래하게 된다. 특히 GO의 경우 carbon nanotube(CNT)나 타입자에 비해 높은 부피비를 가지기 때문에 고분자 사슬 내에 소량의 입자만으로도 높은 부피를 보유하게 된다 (0.1wt.% = 1.5vol%). 따라서 나노 복합재료 제조 시, GO 사이의 응집현상이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 흑연 분말(graphite powder)를 이용하여 GO를 합성하여 실험을 진행하였다. 합성된 GO는 neat 에폭시 수지에 혼합되어 에폭시 나노 복합재료를 제조하는 데 사용되었다. GO의 질량분율을 각각 달리하여 그에 따른 열역학적 특성과 파괴인성 및 기계적 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 에폭시 수지/GO 혼합물의 TG-DTA결과, neat 에폭시 수지에 비하여 열분해 온도가 전체적으로 높게 나타난 것으로 인해 GO가 에폭시 수지에 혼합될 경우에 내열성이 증가하는 것을 확인하였다.
2. 에폭시 나노 복합재료의 동적 기계 분석을 통하여 GO가 neat 에폭시 수지에 첨가될 경우 저장탄성률과  $\tan \delta$  값이 향상됨을 확인하였다. 이는 곧, neat 에폭시 수지의 유리전이온도가 증가하였음을 나타내고, neat 에폭시 수지와 GO사이의 가교네트워크가 형성되었음을 의미한다.
3. 에폭시 나노 복합재료의 파괴인성시험과 파단면 분석을 통하여, neat 에폭시 수지에 첨가되는 GO의 질량분율이 0.5wt.%이상인 경우에 GO사이의 응집현상이 발생하여 상분리 현상으로 인해 복합재료의 가교밀도를 감소시켜, 고분자 사슬 분자사이의 계면 결합력을 저하시키는 작용을 함에 따라 기계적 계면특성을 감소시키는 것을 확인하였다.
4. 인장강도와 굽힘강도 측정 결과를 통하여, neat 에폭시 수지에 GO가 첨가되었을 경우에 기계적 특성이 향상되는 것을 나타내었고, GO의 질량분율이 0.1wt.%일 때 가장 뛰어난 기계적 특성을 나타냄을 확인하였다. 또한 GO를 에폭시 수지에 혼합할 때 일정한 에폭시 사슬의 free volume에 적합한 GO의 크기 및 입자의 양이 투여되어야만 열역학적 및 기계적 특성이 향상됨을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 산업기술혁신사업(10070173)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. N. Tian, R. Ning, and J. Kong, Self-Toughening of Epoxy Resin Through Controlling Topology of Cross-Linked Networks, *Polymer*, **99**(2), 376(2016).
2. B. Demir, K. M. Beggs, B. L. Fox, and L. Servinis, A Predictive Model of Interfacial Interactions Between Functionalised Carbon Fibre Surfaces Cross-Linked with Epoxy Resin, *Composites Science and Technology*, **159**(3), 127(2018).
3. X. Wang and Q. Zhang, Thermal Stability of Some Naphthalene- and Phenyl-Based Epoxy Resins, *Polymer Degradation and Stability*, **40**(2), 385(2004).
4. S. Park, F. Jin, J. Lee, and W. F. Su, Thermal and Mechanical Properties of Tetrafunctional Epoxy Resin Toughened with Epoxidized Soybean Oil, *Materials Science and Engineering: A*, **374**(2), 109(2004).
5. Y. Geng, S. J. Wang, and J. Kim, Preparation of Graphite

- Nanoplatelets and Graphene Sheets, *J. of Colloid and Interface Science*, **336**(2), 592(2009)
6. S. Adam, E. H. Hwang, E. Rossi, and S. D. Sarma, Theory of Charged Impurity Scattering in Two-Dimensional Graphene, *Solid State Communications*, **149**, 1072(2009).
  7. Z. Li, J. Chu, C. Yang, S. Hao, and R. J. Young, Effect of Functional Groups on the Agglomeration of Graphene in Nanocomposites, *Composites Science and Technology*, **163**(28), 116(2018).
  8. S. Wang, H. Sun, H. M. Ang, and M. O. Tade, Adsorptive Remediation of Environmental Pollutants Using Novel Graphene-Based Nanomaterials, *Chemical Engineering J.*, **226**(15), 336(2013).
  9. N. Tian, R. Ning, and J. Kong, Self-Assembly of Three-Dimensional Interconnected Graphene-Based Aerogels and Its Application in Supercapacitors, *J. of Colloid and Interface Science*, **407**(1), 416(2013).
  10. S. I. Abdullah and M. N. M. Ansari, Mechanical Properties of Graphene Oxide (Go)/Epoxy Composites, *Hbrc J.*, **11**(2), 151(2015).
  11. C. Teng, C. M. Ma, C. Lu, S. Yang, and T. Lee, Thermal Conductivity and Structure of Non-Covalent Functionalized Graphene/Epoxy Composites, *Carbon*, **49**(15), 5107(2011).
  12. R. Muzyka, M. Kwoka, Ł. Smędowski, N. Diez, and G. Gryglewicz, Oxidation of Graphite by Different Modified Hummers Methods, *New Carbon Materials*, **32**(1), 15(2017).
  13. N. I. Zaaba, K. L. Foo, U. Hashim, S. J. Tan, and C. H. Voon, Synthesis of Graphene Oxide Using Modified Hummers Method: Solvent Influence, *Procedia Engineering*, **184**, 469(2017).
  14. Y. Chen, B. Dang, C. Jin, B. Chen, and Y. Nie, Bio-Inspired Layered Nanolignocellulose/Graphene-Oxide Composite with High Mechanical Strength Due To Borate Cross-Linking, *Industrial Crops and Products*, **118**, 65(2018).
  15. N. P. Hung, W. Zhou, E. T. Peh, and C. S. Chan, Fracture Toughness and Low Cycle Fatigue of 6061/A12O3P Composites, *Composites Engineering*, **5**(5), 509(1995).
  16. O. Li, X. Wang, H. Chen, J. Hu, and G. Gou, Influence of Heat Treatment on the Strength and Fracture Toughness of 7N01 Aluminum Alloy, *J. of Alloys and Compounds*, **678**, 160(2016).
  17. R. Aradhana, S. Mohanty, and S. K. Nayak, Comparison of Mechanical, Electrical and Thermal Properties in Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Filled Epoxy Nanocomposite Adhesives, *Polymer*, **141**, 109(2018).