

# 그래핀 옥사이드(GO)의 환원정도가 PC-GO 화학반응 및 물성에 미치는 영향

박주영 · 신진환 · 김연철<sup>†</sup>

공주대학교 신소재공학부 고분자공학전공  
(2014년 10월 6일 접수, 2014년 10월 28일 심사, 2014년 11월 5일 채택)

## Effects of the Degree of GO Reduction on PC-GO Chemical Reactions and Physical Properties

Ju Young Park, Jin Hwan Shin, and Youn Cheol Kim<sup>†</sup>

Major in Polymer Science and Engineering, Division of Advanced Material Engineering, Kongju National University, 275  
Budaе-Dong, Cheonan 330-717, Korea

(Received October 6, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted November 5, 2014)

### 초 록

3 phr의 그래핀 옥사이드(GO)를 포함하는 폴리카보네이트(PC)/GO를 클로로포름에서 용액 혼합하여 응고물 침전 후 240, 260, 280 °C의 이축압출기를 이용하여 PC/GO 복합체를 제조하였다. DSC와 TGA 측정결과 PC/GO 복합체의 유리전이 온도( $T_g$ )의 변화는 거의 없었고, 분해거동을 통해 확인한 열안정성의 경우 260 °C 압출시편이 우수하게 나타났다. 동적기계적분석(DMA)을 이용한 저장탄성률 측정결과 PC 대비 PC/GO 복합체의 값이 크게 나타났으며 압출온도별로는 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 이들 결과로부터 환원시간에 따른 PC/RGO 복합체의 압출온도를 260 °C로 고정하였다. GO의 환원시간에 따른 PC/RGO 복합체의 화학반응 정도는 3000  $\text{cm}^{-1}$  부근에서 나타나는 C-H 신축진동 피크를 통해 확인하였고, 환원시간이 1 h일 때의 GO와 유사한 화학반응 정도를 나타내었다. GO의 환원시간에 따른 PC/GO 복합체의 복소점도(complex viscosity)가 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 PC-GO 사이의 화학반응에 의한 분산성에 기인한 것으로 주사전자현미경(SEM)을 통해 확인하였다.

### Abstract

Polycarbonate (PC)/graphene oxide (GO) composites with 3 phr of GO were prepared by using a twin screw extruder at 240, 260, and 280 °C after mixing the solution with chloroform. It was confirmed by DSC and TGA that the glass transition temperature ( $T_g$ ) of PC/GO composites were not changed and the thermal stability was the best in case of the extrusion temperature at 260 °C. Thermo mechanical properties of PC/GO composites according to extrusion temperatures were measured by dynamic mechanical analysis (DMA). Storage moduli of PC/GO composites were higher than that of pure PC and there was no detectable changes at varying the extrusion temperature. Based on these results, the extrusion temperature of PC/GO composites was fixed at 260 °C. The degree of the chemical reaction of PC/GO composites with respect to the GO reduction time was confirmed by the C-H stretching peak at 3000  $\text{cm}^{-1}$  and the degree of the chemical reaction was similar to that of GO when the reduction time was 1 h. A decrease in the complex viscosity as a function of the GO reduction time was detected by dynamic rheometer, which may be originated from the enhancement of GO dispersion by PC-GO reaction. The GO dispersion was confirmed by scanning electron microscope (SEM).

**Keywords:** Polycarbonate, Graphene Oxide, Reduction Time, Chemical Reaction

## 1. 서 론

엔지니어링 플라스틱 중 하나인 폴리카보네이트(polycarbonate, PC)는 투명성, 내충격성, 기계적 강도, 내열성, 치수안정성 등이 우수하여 전기·전자부품 소재 및 자동차 산업 등에 폭넓게 사용되고 있다 [1,2]. 최근 전자기기가 우리 주변에 대량 보급되면서 전자과 차폐소

재에 대한 관심이 증가되고 있고, 지구 온난화 및 석유자원고갈에 따른 대체에너지의 일환으로 전기자동차의 관심이 급증하면서 자동차 용 부품 소재의 전도성 부여와 관련된 연구개발이 증가하고 있는 추세이다[3,4].

PC에 전도성을 부여하는 연구개발 중 그래핀(graphene)을 이용한 복합체 연구가 최근 각광을 받고 있다. 그래핀은 무수히 많은 벤젠고리의 집합체로써 2004년 영국 Geim과 Novoselov 연구진에 의해 접착 테이프를 이용한 흑연으로부터의 그래핀 박리 기술이 소개되었으며, 많은 연구의 대상이 되고 있는 만큼 우수하고 특이한 성질을 가진다 [5]. 그래핀은 뛰어난 열 전도성, 전기 전도성, 기계적 물성을 가지며, 매우 높은 전기 이동성과 매우 투명한 광학적 성질도 가지고 있다고 알려져 있다[6,7].

<sup>†</sup> Corresponding Author: Kongju National University,  
Major in Polymer Science and Engineering, Division of Advanced Material  
Engineering, 275 Budaе-Dong, Cheonan 330-717  
Tel: +82-41-521-9395 e-mail: younkim@kongju.ac.kr

그래핀의 제조방법은 반데르발스힘(van der Waals force)에 의해 층상구조로 이루어진 흑연으로부터 그래핀 한층을 분리하는 방법과 화학 기상증착법(CVD), 화학적 박리법 등이 있다. 특히, 화학적 박리법은 흑연을 산화시켜 산화그래핀(graphene oxide, GO)을 만든 후 환원시켜 환원그래핀(reduced graphene oxide, RGO)을 만드는 방법으로 대량생산의 가능성이 있는 장점 때문에 많은 연구가 진행되고 있다[8].

최근에는 그래핀을 고분자 매트릭스에 균일하게 분산시켜 기계적 물성, 열전도도, 전기 전도도 등의 물리화학적 특성들을 향상시키려는 연구들이 수행되어오고 있다[9-11]. 하지만 그래핀의 경우 반데르발스 힘 때문에 응집되는 성질이 있으며, 안정된 화학 구조를 이루고 있어 고분자 수지와 용매에 분산이 어렵고, 복합재료에서는 이런 특성에 의해 복합재료 내부에 기공(void) 형성 및 균열(crack)을 유도하여 재료의 기계적 물성을 크게 감소시킨다[12].

반면에 GO의 경우 산소 작용기(에폭시, 수산화기, 카르복시기 등)를 가지고 있어 그래핀보다 용매에 분산시키기 쉬워 *in-situ* 중합이 용이하고, 고분자/GO 복합체 제조 시 고분자 매트릭스에 GO의 분산성을 높이기가 용이하다. 그러나 GO의 경우 산소 작용기들의 영향으로 그래핀보다 전기전도도가 낮기 때문에 복합체에 GO를 적용시켰을 때 전기전도도를 높이기 위한 연구가 많이 이뤄지고 있다[11,13]. PC/GO 복합체에 열을 가할 경우 일부 산소 작용기의 열 환원이 확인되었지만 요구하는 전기적 특성에는 충분하지 않은 상태이다.

이에 대한 개선방법으로 기존의 화학적 환원방법을 적용하여 환원 시간에 따라 GO의 환원 정도를 조절하고, 조절된 GO의 PC/RGO 압출시편에 대한 화학반응정도 및 GO 분산성 등에 대한 체계적인 연구의 필요성이 제기되었다.

따라서 본 연구에서는 1차적으로 이축압출기(twin screw extruder)의 압출온도를 변화하여 PC/GO 복합체의 기초 물성이 양호한 압출조건을 선정하고, GO의 환원시간에 따른 PC/RGO 복합체를 제조하고, FT-IR을 이용하여 PC-GO의 화학반응 정도를 고찰하고, PC/RGO 복합체의 기초물성과 GO의 분산성을 DSC, TGA, XRD, SEM, 라만 분광기, 동적 유변측정기 등을 이용하여 비교분석하고 체계화하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

GO는 IDT International의 GO-4401을 사용하였으며, PC는 삼양사의 TRIREX® 3025 (MI 9)를 사용하였다. 시약은 하이드라진 하이드레이트(55%, Sigma Aldrich), 클로로포름(99.5%, 삼전화학), n-헥산(95%, 삼전화학)을 추가 정제 없이 사용하였다.

### 2.2. 압출 온도에 따른 PC/GO 복합체 제조

PC/GO 복합체는 용액혼합을 한 후, 압출온도 240, 260, 280 °C로 이축압출기를 이용하여 PC/GO 복합체를 제조하였다. 50 g의 PC를 클로로포름 500 mL에 녹이고, 1.5 g의 GO에 125 mL의 클로로포름을 넣고 1 h 동안 초음파 처리를 한다. 용해된 PC 용액에 초음파 처리된 GO를 넣고 1 h 동안 강하게 교반한다. 교반 후 과량의 n-헥산에 넣어 응고시킨 후 응고물을 건조한다. 건조시킨 응고물을 이축압출기를 이용하여 위의 배럴온도에서 40 rpm의 조건으로 용융 압출하였다.

### 2.3. 환원시간이 다른 GO의 제조

3 g의 GO를 증류수에 넣고 12 h 동안 초음파 처리를 한다. 초음파 처리된 혼합액에 하이드라진 하이드레이트 3 mL를 넣고 100 °C에서 각

각 1, 6, 24 h 동안 반응시킨다. 반응이 종결되면 물과 에탄올을 1 : 1 비율로 하여 2-3번 세척한 뒤 80 °C에서 진공 건조하여 RGO1, RGO6, RGO24를 얻는다.

### 2.4. GO의 환원시간에 따른 PC/RGO 복합체 제조

PC/RGO 복합체는 환원시간이 다른 GO를 이용하여 위와 동일한 방법으로 제조하였고, 이때 다이, 배럴, 호퍼의 온도는 각각 250, 260, 230 °C이고 스크류 rpm은 40으로 고정하였다.

### 2.5. 분석 및 측정

GO의 환원 여부 및 복합체의 화학반응 확인을 위해 FT-IR (Perkin Elmer spectrum 1000)을 사용하였으며, 구조적 변화를 분석하기 위해 514 nm의 파장을 이용하는 라만 분광기(Horiba Jobin Yvon, LabRam)를 사용하였다. 복합체의 열적 특성은 냉각장치가 부착된 시차주사열량분석기(DSC, TA Instruments Q20)를 이용하여 -50 °C에서 300 °C까지 승온 및 냉각 속도를 10 °C/min으로 하여 유리전이 온도를 측정하였으며, 열중량분석기(TGA, TA Instruments Q50)를 이용하여 승온 속도를 10 °C/min으로 상온에서 800 °C까지 분해거동을 측정하였다. 동적유변측정기(MCR 301, Aton Paar, 오스트리아)를 이용하여 직경 25 mm의 parallel plate를 사용하여 주파수 100~0.01 s<sup>-1</sup>, gap size 0.9 mm, 260 °C에서 복소점도(complex viscosity)와 저장탄성률(storage modulus)을 측정하였다. Strain sweep 실험결과 strain은 구간별로 선형이 유지되는 영역의 strain 값인 10%로 고정하였다. 시편은 240 °C에서 각각에 맞는 몰드를 이용하여 가열프레스를 이용하여 제조하였다. PC 내의 GO의 분산성을 알아보기 위해 시료의 절단면을 금박(gold sputter coating)하여 주사전자현미경(SEM, Tescan Mira3)을 이용하여 관찰하였다. 동적기계적측정기(DMA, DMA Q800)는 40 °C ~ 200 °C의 온도 범위에서 strain 0.1%, 주파수 1 Hz, 승온속도 5 °C/min으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 압출온도에 따른 PC/GO 복합체의 기초 물성 분석

PC/GO 복합체의 열적 특성을 알아보기 위해 DSC, TGA를 측정하였고, DSC 측정결과를 Figure 1과 Table 1에 나타내었다. PC, PC/GO 240, PC/GO 260, PC/GO 280의 유리전이온도( $T_g$ )는 각각 152.3, 153.3, 152.3, 152.9 °C로 나타났으며 PC와 비교하였을 때 압출 온도에 따른 유리전이온도의 변화는 나타나지 않았다. 다음으로 Figure 2에 TGA 측정결과를 나타내었고, Table 1에 5 wt% 무게순실에서 분해온도( $T_d$ )를 나타내었다. PC의 분해온도는 470.9 °C에서 나타났으며, 압출온도가 240, 260, 280 °C일 때 분해온도는 각각 484.0, 485.5, 483.8 °C로 GO가 첨가됨에 따라 PC보다 10 °C 이상 높은 값을 보였고, 큰 차이는 아니지만 260 °C 압출시료의 분해온도가 가장 높은 결과를 나타내었다. 이는 일부 GO의 산소작용기가 압출기 내에서 열 환원이 되는데 240 °C에서 보다 온도가 높은 260 °C에서 열 환원이 우세하여 GO 표면에 남아있는 산소작용기가 작기 때문에 240 °C보다 열안정성이 높아진다. 또한 280 °C에서 분해온도가 감소하는 이유는 가공 온도가 높아 PC 사슬이 일부 분해되기 때문이다.

압출온도에 따른 PC/GO 복합체의 기계적 물성의 변화를 알아보기 위해 동적기계적측정기를 이용하여 온도에 따른 저장탄성률을 측정하였다. 40 °C에서 측정된 PC/GO 복합체의 저장탄성률은 Table 1에 나타내었고, Figure 3에 온도에 따른 저장탄성률의 변화를 나타내었

Table 1. Thermal and Mechanical Properties of PC/GO Composites

Sample	$T_g$ (°C)	$T_{d,5\%}$ (°C)	Storage Modulus (MPa)
pure PC 260	152.3	470.9	1351.0
PC/GO 240	153.3	484.0	1541.1
PC/GO 260	152.3	485.5	1547.1
PC/GO 280	152.9	483.8	1566.6

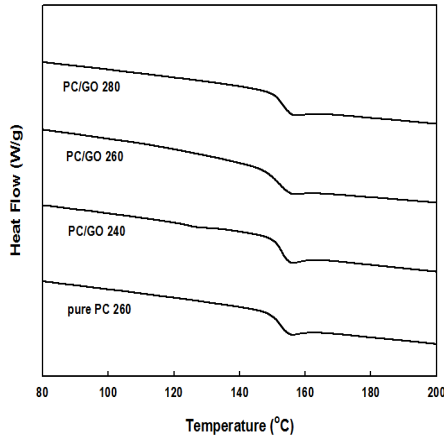


Figure 1. DSC thermograms of PC/GO composites with different extrusion temperature.

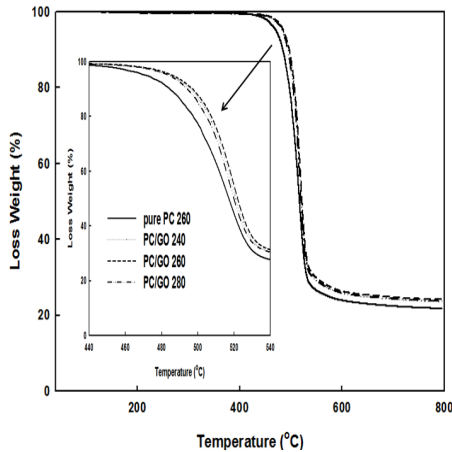


Figure 2. TGA thermograms of PC/GO composites with different extrusion temperature.

다. PC와 비교할 때 PC/GO 복합체의 저장탄성률이 크게 나타났으나, 압출온도 변화에 따른 저장탄성률의 변화는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

이들 결과로부터 환원시간이 다른 PC/GO 복합체의 압출온도는 260 °C로 하여 진행하였다.

3.2. GO 환원시간에 따른 PC/RGO 복합체의 화학반응 및 기초물성

환원시간에 따른 GO의 산소 작용기의 변화를 살펴보기 위해 FT-IR 을 측정하여 Figure 4에 나타내었다. GO의 경우 3400  $cm^{-1}$ 에서 수산기(-OH), 1741  $cm^{-1}$ 에서 카보닐기(C=O), 1085  $cm^{-1}$ 에서 에테르기(C-O-C) 결합이 나타나는 반면, GO의 환원시간이 증가함에 따라 GO에 포함되어 있는 산소 작용기들(수산기, 카보닐기, 에테르기)이 환원

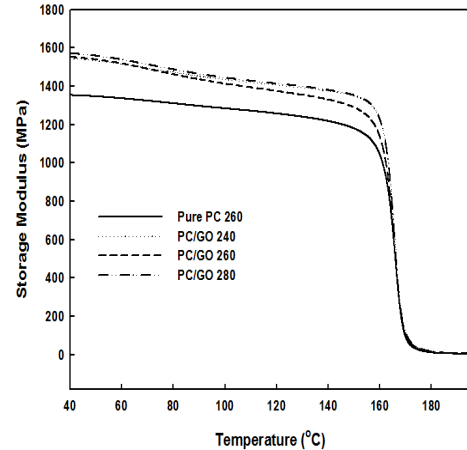


Figure 3. Storage moduli of PC/GO composites with different extrusion temperature.

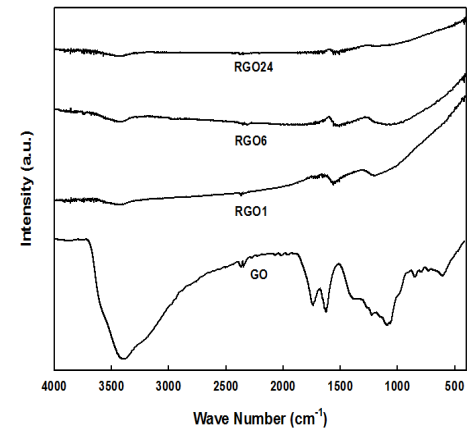


Figure 4. FT-IR spectra of GO and RGO with different reduction time.

되어 이들 작용기 피크들이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

다음은 복합체 제조 후의 PC-GO 화학반응 정도를 살펴보기 위해 복합체 내의 PC를 제거하고 분리하여 남은 물질인 PC-GO 및 PC-RGO1, PC-RGO6, PC-RGO24의 FT-IR을 측정하였다. PC/GO, PC/RGO 복합체를 클로로포름으로 수차례 세척한 후 건조시켜 잔여 물의 FT-IR 스펙트럼을 Figure 5에 나타내었다. Figure 4의 GO 및 RGO의 FT-IR 스펙트럼과 비교할 때 PC-GO 및 PC-RGO의 경우 3000  $cm^{-1}$  부근에서 나타나는 C-H 신축 진동 피크가 나타났으며, 이 피크의 크기는 GO의 환원시간이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 PC가 결합할 수 있는 작용기의 수가 감소하기 때문으로 해석할 수 있다. 1710  $cm^{-1}$  부근에서 나타나는 카르보닐(C=O) 피크의 크기는 RGO보다 크게 나타나고 있는데 이 또한 PC와 GO 사이의 화학반응에 의한 것으로 해석할 수 있으며, PC와 비교할 때 복합체의 카르보닐 피크가 낮은 파수로 이동하는데 이것은 화학반응에 의한 작용기의 환경이 달라지기 때문이다[14]. Figure 5에서 3400  $cm^{-1}$  부근에 나타나는 하이드록시 피크는 물에 의한 피크로 판단된다.

Figure 6은 복합체에서 PC를 제거한 후 RGO와 결합되어 있는 PC의 양을 확인하기 위해 TGA 측정 결과를 나타낸 것이다. 120 °C 아래에서 나타나는 무게 감소는 남아있는 물 분자와 용매 등의 증발에 의한 것으로 판단된다. GO의 경우 200 °C 근처에서 GO 표면의 산소작용기들이 분해되면서 무게손실이 크게 나타나는 반면, 순수 RGO의

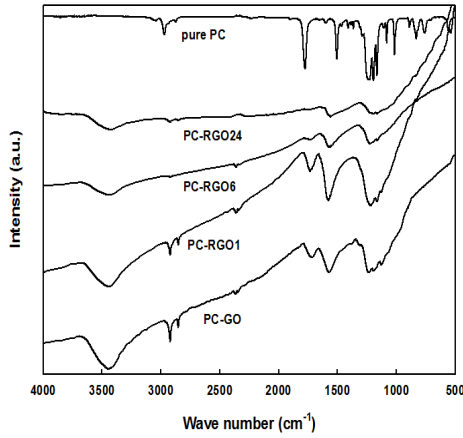


Figure 5. FT-IR spectra of PC/GO composites after extracting PC.

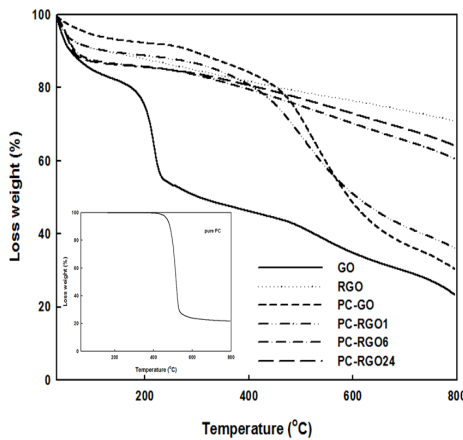


Figure 6. TGA thermograms of PC/GO composites after extracting PC.

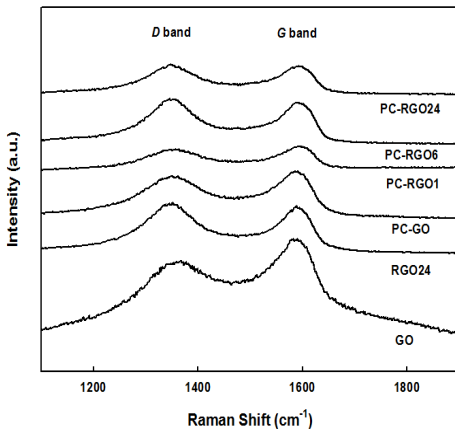


Figure 7. Raman spectra of PC/GO and PC/RGO composites after extracting PC.

경우는 GO와 달리 분해되는 정도가 매우 약하게 나타나는 것을 알 수 있다[15]. PC-RGO6, PC-RGO24와 달리 PC-GO와 PC-RGO1의 TGA 결과는 400 °C 부근에서 큰 폭의 무게 감소를 보여주는데, 이는 GO의 환원시간이 6 h 이상 되면 대부분의 작용기들이 환원되어 PC와의 화학반응이 적기 때문인 것으로 해석될 수 있고, 용매와의 분산성 및 PC와의 화학반응 등을 고려할 때 GO의 환원시간은 1 h 이내로 처리하는 것이 적절한 것으로 평가된다.

Table 2. Thermal Properties of PC/GO and PC/RGO Composites

Sample	$T_g$ (°C)	$T_{d,5\%}$ (°C)
pure PC	150.7	402.8
PC/GO	149.8	448.1
PC/RGO1	151.8	469.5
PC/RGO6	149.5	466.5
PC/RGO24	151.0	461.2

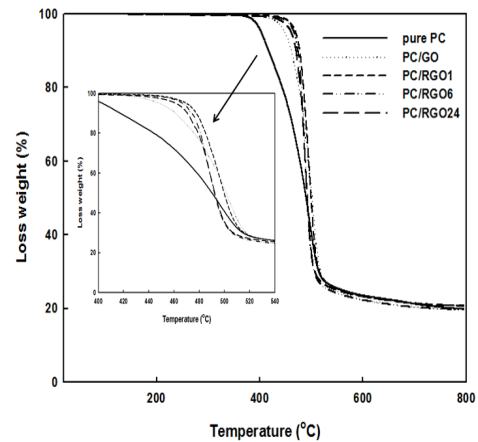


Figure 8. TGA thermograms of PC/GO and PC/RGO composites.

라만 분광법은 그래핀과 같은 탄소 물질의 결합 특성 등을 고찰하기 위해 널리 사용되는 분광법 중 하나이다. PC를 제거한 복합체 잔여물의 라만 스펙트럼을 Figure 7에 나타내었다. 1350  $cm^{-1}$  부근에서 나타나는 D band는  $A_{1g}$  breathing 모드에 의한 피크로 시료 내 결합이 많을 경우 관찰되며 1585  $cm^{-1}$  부근에서 나타나는 G band는  $E_{2g}$  모드의 1차 산란에 대응하는 피크로 흑연계 물질에서 공통적으로 나타나는 피크로 알려져 있다[16-18]. 탄소 결합 구조의 규칙성과 관련 있는 D band와 G band의 크기 비인  $I(D)/I(G)$ 는  $sp^2$  도메인의 평균크기에 반비례 한다[17].  $I(D)/I(G)$ 의 값은 GO, PC/GO, PC/RGO1, PC/RGO6, PC/RGO24 순으로 각각 0.76, 0.86, 0.87, 1.04, 1.05의 값을 보여주었다. GO의  $I(D)/I(G)$ 보다 복합체의  $I(D)/I(G)$  값이 더 크게 나타나는 데 이는 GO 환원 시 초음파 처리에 의한 RGO 격자 내에 결합이 생기기 때문이고, GO의 환원시간이 증가할수록 복합체의  $I(D)/I(G)$  값이 증가한 것은 PC와 RGO의 결합수의 감소로 인하여  $sp^2$  도메인의 평균크기가 감소하기 때문으로 판단되며 이는 기존 연구결과와 유사한 현상이다[17].

PC/GO 및 PC/RGO 복합체의 열적 특성을 고찰하기 위해 DSC와 TGA 실험을 수행하여 유리전이온도 및 5 wt% 무게 손실에서의 분해온도를 Table 2에 정리하였다. PC와 비교할 복합체들의 유리전이온도는 150 °C 근처로 큰 차이를 나타내지 않은 반면 Figure 8에 보여주는 것처럼 분해온도에는 큰 차이를 보였다. GO 및 RGO가 첨가됨에 따라 분해온도가 50에서 70 °C 정도까지 큰 폭으로 증가하였으며, RGO가 첨가된 복합체의 경우 증가 폭이 더 크게 나타났다. 이는 GO의 경우 표면에 PC와 결합하지 않고 남아있는 산소작용기가 분해되어 열안정성이 RGO 대비 열세하기 때문으로 해석된다. 또한 PC/RGO24의 경우 PC/RGO1보다 분해온도가 낮게 나타나는 데, 이것은 RGO24의 경우 환원시간이 길어짐에 따라 남아있는 작용기 수가 감소하여 결합

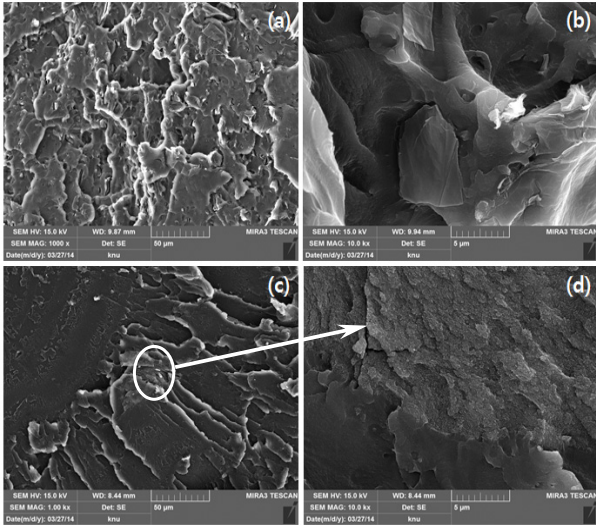


Figure 9. SEM images of PC/GO ((a), (b)) and PC/RGO ((c), (d)) composites.

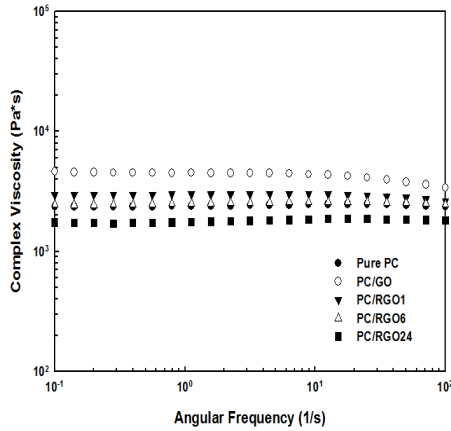


Figure 10. Complex viscosities of PC/GO and PC/RGO composites.

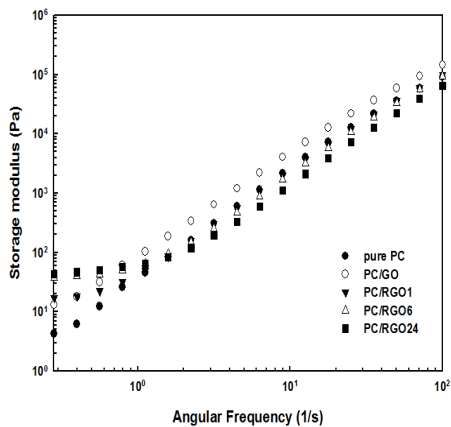


Figure 11. The storage modulus vs. frequency of PC/GO and PC/RGO composites.

한 PC의 수가 감소하면서 RGO와 PC 사이의 상호작용이 줄어들기 때문으로 해석할 수 있다[19].

다음은 PC/GO 복합체와 PC/RGO 복합체의 분산성을 고찰하기 위

해 주사전자현미경(SEM)을 측정하여 Figure 9에 나타내었다. PC/GO 복합체(Figure (a), (b))의 경우 GO의 stacking 현상이 없이 잘 분산이 되었다는 것을 알 수 있는 반면에 PC/RGO 복합체(Figure (c), (d))의 경우 분산이 잘 되지 않고 뭉쳐 있는 현상을 확인할 수 있었다. RGO의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 van der Waals 힘에 의해 stacking이 생겨 뭉치려는 경향이 강하여 분산성이 나빠지게 되는 것으로 알려져 있다[13]. 반면에 GO의 경우 산소 작용기들이 GO 표면에 분포되어 있어 PC와의 화학결합이 용이하기 때문에 PC/RGO 복합체보다 분산성이 향상되는 것으로 해석된다.

CNT와 같은 무기필러가 고분자에 복합화될 때 분산성이나 표면 결합 정도가 복소점도(complex viscosity), 탄성률 등과 같은 유변학적 특성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[20]. PC/GO 및 PC/RGO의 주파수에 따른 복소점도를 Figure 10에 나타내었다. 환원시간이 짧은 RGO나 GO를 이용한 복합체의 복소점도가 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이는 PC-GO사이의 화학반응이 증가하여 점도에 대한 무기필러의 영향이 크게 반영되어 나타나는 현상으로 해석할 수 있다. Figure 11은 주파수 변화에 따른 저장탄성률의 변화를 나타낸 것이다. 주파수가 증가함에 따라 고체적 특성이 점차 강해져 저장탄성률은 증가하게 된다[21]. 일반적으로 단분산 고분자 사슬의 경우에는 저주파수 영역에서 나타나는 저장탄성률의 터미널 거동인  $G' - \omega^2$  현상이 나노필러를 첨가함으로써 완만해지는데 이는 첨가한 입자의 존재로 인해서 고분자의 완화 거동이 억제되어 액체적 거동에서 고체적 거동으로의 전이가 일어나기 때문이다[22]. 고주파수 영역으로 갈수록 저장탄성률 변화의 폭이 적게 되는데 이는 높은 전단력으로 PC의 유변물성이 크게 작용하기 때문이다[21].

#### 4. 결 론

이축압출기의 압출온도를 달리하여 제조한 PC/GO 복합체의 기초 물성 평가결과 배럴온도 기준 260 °C 압출온도가 최적임을 나타내었고, 압출온도 260 °C에서 GO의 환원시간을 달리한 PC/RGO 복합체를 용액 및 용융혼합을 이용하여 제조하였다. GO의 환원시간이 증가할수록 PC-GO 사이의 화학결합 정도가 감소하는 것을 3000  $cm^{-1}$  근처에서 나타나는 C-H 신축진동 피크를 통해 확인하였다. 환원시간이 1 h인 PC/RGO1 복합체의 화학반응 정도가 PC/GO 복합체와 유사한 정도를 나타내었고, *in-situ* 중합이나 분산성 등을 고려할 때 환원시간은 1 h 정도가 적절함이 확인되었다. PC/GO 대비 환원시간이 24 h인 PC/RGO24의 필러 분산성이 열세함을 SEM 이미지를 통해 확인하였다. GO의 환원시간이 증가할수록 복합체의 복소점도가 감소하는 것을 확인하였고, 주파수에 따른 저장탄성률의 터미널 기울기가 감소하는 현상으로 복합체의 탄성특성이 증가하는 것을 확인하였다.

#### 감 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업(No. : 2012R1A1A2003989).

#### References

1. B. Y. Lee, P. Dahal, H. S. Kim, S. Y. Yoo, and Y. C. Kim, A study on the molecular weight control and rheological properties of branched polycarbonate, *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 388-393 (2012).

2. S. J. Choi, K. H. Yoon, I. H. Hwang, C. Y. Lee, H. S. Kim, S. Y. Yoo, and Y. C. Kim, Effect of solvent extraction on the low molecular weight and volatile organic compounds of polycarbonate, *Appl. Chem. Eng.*, **21**, 532-536 (2010).
3. H.-J. Kim and G. J. Um, The manufacturing of electromagnetic shielding sheet using the carbon and wood fiber mixture, *Journal of Korea TAPPI*, **38**, 68-75 (2006).
4. C.-O. Kim and J.-W. Kim, The effects of dopants and adding materials on electrical and electromagnetic interference shielding properties of polyaniline films, *Journal of Natural Sciences*, **19**, 67-72 (2000).
5. H.-G. Moon and J.-H. Chang, Syntheses and characterizations of functionalized graphenes and reduced graphene oxide, *Polymer(Korea)*, **35**, 265-271 (2011).
6. B. Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J. W. Suk, J. R. Potts, and R. S. Ruoff, Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications, *Adv. Mater.*, **22**, 3906-3924 (2010).
7. J. T. Han, S. Y. Jeong, H. J. Jeong, and G.-W. Lee, Preparation of chemically exfoliated graphene nanosheets and its applications, *KIC News*, **15**, 23-37 (2012).
8. S. Park, History of graphene oxide and future direction, *KIC News*, **16**, 1-5 (2013).
9. M. Fang, K. Wang, H. Lu, Y. Yang, and S. Nutt, Covalent polymer functionalization of graphene nanosheets and mechanical properties of composites, *J. Mater. Chem.*, **19**, 7098-7105 (2009).
10. H. Kim, S. Kobayashi, M. A. AbdurRahim, M. J. Zhang, A. Khusainova, M. A. Hillmyer, A. A. Abdala, and C. W. Macosko, Graphene/polyethylene nanocomposites: Effect of polyethylene functionalization and blending methods, *Polymer*, **52**, 1837-1846 (2011).
11. N. Yousefi, X. Sun, X. Lin, X. Shen, J. Jia, B. Zhang, B. Tang, M. Chan, and J.-K. Kim, Highly aligned graphene/polymer nanocomposites with excellent dielectric properties for high performance electromagnetic interference shielding, *Adv. Mater.*, **26**, 5480-5487 (2014).
12. A. Yasmin, J.-J. Luo, and I. M. Daniel, Processing of expanded graphite reinforced polymer nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 1182-1189 (2006).
13. J. Zhu, J. Lim, C.-H. Lee, H.-I. Joh, H. C. Kim, B. Park, N.-H. You, and S. Lee, Multifunctional polyimide/graphene oxide composites via *in situ* polymerization, *J. Appl. Polym. Sci.*, Doi:10.1002/APP.40177 (2014).
14. B. Shen, W. Zhai, M. Tao, D. Lu, and W. Zheng, Enhanced interfacial interaction between polycarbonate and thermally reduced graphene induced by melt blending, *Compos. Sci. Technol.*, **86**, 109-116 (2013).
15. S. Park, J. An, J. R. Potts, A. Velamakanni, S. Murali, and R. S. Ruoff, Hydrazine-reduction of graphite- and graphene oxide, *Carbon*, **49**, 3019-3023 (2011).
16. A. C. Ferrari and J. Robertson, Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, *Phys. Rev. B*, **61**, 95-107 (2000).
17. S.-H. Hwang, H.-J. Kim, D.-H. Sung, Y.-T. Jung, K.-H. Kang, and Y.-B. Park, Effect of interfacial bonding on piezoresistivity in carbon nanotube and reduced graphene oxide polymer nanocomposites, *Journal of Adhesion and Interface*, **13**, 137-144 (2012).
18. S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide, *Carbon*, **45**, 1558-1565 (2007).
19. B. Shen, W. Zhai, M. Tao, D. Lu, and W. Zheng, Chemical functionalization of graphene oxide toward the tailoring of the interface in polymer composites, *Compos. Sci. Technol.*, **77**, 87-94 (2013).
20. J. A. Kim, D. G. Seong, T. J. Kang, and J. R. Youn, Effect of surface modification on rheological and mechanical properties of CNT/epoxy composites, *Carbon*, **44**, 1898-1905 (2006).
21. H. Y. Yeom, H. Y. Na, and S. J. Lee, Influence of graphene oxide and graphite nanoplatelets on rheological and electrical properties of polystyrene nanocomposites, *Polymer(Korea)*, **38**, 502-509 (2014).
22. F. Du, R. C. Scogna, W. Zhou, S. Brand, J. E. Fischer, and K. I. Winey, Nanotube networks in polymer nanocomposites: rheology and electrical conductivity, *Macromolecules*, **37**, 9048-9055 (2004).