

Aluminum-exfoliated Graphite Nanoplatelet 혼성 입자를 이용한 Polycarbonate 복합체의 기계적 성질과 열전도도

김진섭 · 이영실* · 윤관한[†] · 한종훈**

금오공과대학교 화학공학과, *금오공과대학교 산학협력단, **전남대학교 화학공학과
(2020년 10월 29일 접수, 2020년 12월 9일 수정, 2020년 12월 9일 채택)

Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Polycarbonate Composite Containing Aluminum-exfoliated Graphite Nanoplatelet Hybrid Powder

Jin Seob Kim, Young Sil Lee*, Kwan Han Yoon[†], and Jong Hun Han**

Dept. of Chemical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

*Industry-Academic Cooperation Foundation, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

**School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received October 29, 2020; Revised December 9, 2020; Accepted December 9, 2020)

초록: 본 연구에서는 폴리카보네이트/알루미늄-팽창흑연 나노판(PC/Al-xGnP) 복합체가 제조하였다. PC 복합체 제조에 앞서 두 종류의 Al-xGnP 혼성 입자가 제조되었는데 하나는 xGnP가 Al-flake에 완전 삽입된 입자이고 다른 하나는 부분 삽입된 입자이다. 두 종류의 혼성 입자의 삽입 정도는 투과 전자 현미경으로 확인하였다. 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 열전도도는 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체보다 모든 함량에서 높게 관찰되었다. 반면에, 기계적인 성질은 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체가 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체보다 우수하였다.

Abstract: Polycarbonate/aluminum-exfoliated graphite nanoplatelets (PC/Al-xGnP) composites were prepared. Prior to the preparation of the composite, two types of Al-xGnP hybrid powder were prepared, one is fully inserted xGnP and the other is partially inserted xGnP in Al-flakes. TEM images of hybrid powder showed the partially and fully inserted xGnP in Al-flakes. The thermal conductivity of partially inserted PC/Al-xGnP composite was higher than that of fully inserted PC/Al-xGnP composite at the same filler concentration. On the other hand, the fully inserted PC/Al-xGnP composite was superior to the partially inserted PC/Al-xGnP composite in terms of mechanical properties.

Keywords: polycarbonate, aluminum-exfoliated graphite nanoplatelets, composite, thermal conductivity, mechanical properties.

서 론

흑연(graphite)은¹ 높은 전기전도도, 열전도도, 그리고 윤활 특성으로 인해 전도성 고분자 복합체, 전자재료, 이차전지 전극, 연료전지, 슈퍼캐패시터, 유연전극 등에 많이 사용되어 왔다. 그러나 우수한 전기전도도와 열전도도를 얻기 위해서는 많은 양의 흑연이 필요하고 그로인해 분산이 어려워져 결국 복합체의 기계적인 성질을 감소시키는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 2차원 구조의 그래핀을 합성하거나 흑연을 산화시켜서 박리를 시키고 이를

다시 환원시키는 형태로 reduced graphene oxide(RGO)를 제조하여 사용하려는 노력을 하고 있으나 비용 및 불완전한 환원에 의한 결함으로 인해 산화 과정 없이 흑연을 팽창시켜 0.35-100 nm의 두께를 가지는 팽창흑연나노판(exfoliated graphite nanoplatelets, xGnP)으로 제조하면 높은 종횡비와 넓은 표면적을 가지게 되어 복합체에 유용한 첨가제로 사용될 수 있어 전자파차폐, 높은 열전도도 및 가스 투과성 등 여러 새로운 분야에 응용이 되어 왔다.

폴리카보네이트(PC)는 기계적 성질과 열적 성질 뿐 아니라 광학적 성질이² 우수한 중요한 고분자 중 하나이다. 이러한 우수한 성질로 인하여 항공기 유리, 전자제품, 헬멧 및 렌즈³ 등에 폭 넓게 사용되고 있다. 이러한 우수한 특성에도 불구하고 PC는 일반 고분자 재료와 같이 낮은 열 및 전기전도도로 인해서 확장 가능한 전자파 차폐, 열 계면 물질 등의 여

[†]To whom correspondence should be addressed.
khyoon@kumoh.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-4127-9808
©2021 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

러 응용분야에 적용이 불가능하여 이를 극복하기 위해 알루미늄이나 구리 혹은 합금 등을 분산시켜서 해결하려는 연구가 많이 수행되어 왔다. 금속계통의 입자는 고분자 내에서 분산이 어렵고 계면 접착력이 부족하여 고분자의 기계적 물성, 전기전도도, 그리고 열전도도를 향상시키기 위해서는 어려운 점이 많이 존재한다.

PC와 xGnP 또는 GnP와의 용융 혼합에 대한 연구는^{4,12} 많이 보고가 되지는 않았지만 산업적인 측면에서 분명한 장점이 있고 압출기와 사출기 같은 공정장비를 이용하여 쉽게 복합화할 수 있는 장점이 있다. Oyarzabal 등은⁵ 7 wt% GnP 함량에서 PC에 비해 인장 탄성률이 52% 증가하였다고 보고하였다. 또한 King 등은⁶ GnP 3 wt%와 7 wt%를 용융 혼합하였을 때 인장 탄성률이 각각 PC에 비해 9%와 50% 증가하였다고 발표하였다. 이와 달리 그래핀의 분산을 증가시키기 위하여 Yoon 등은¹² 그래핀 나노시트에 PC를 그래프팅하여 PC-g-MGNS 복합체를 제조하고 3 wt% 그래핀을 함유하는 복합체는 인장강도에서 20%의 증가와 인장 탄성률에서 23%의 증가가 얻어졌다고 보고하였다.

기존의 연구에서는 고분자 내에 xGnP나 GnP를 분산시키기 위해 고분자나 GnP를 기능화시키는 연구에 치중하였으나 본 연구에서는 Al-flake를 이용하여 미리 혼합입자를 제조함으로써 복합체 제조 시 xGnP의 재응집(re-aggregation)을 막아서 나노입자의 분산성을 향상시키고자 하였다. 이전의 연구에서도¹³ PC에 CNT의 분산을 증가시키기 위하여 Al-flake를 이용한 결과 PC/Al-CNT 복합체의 인장 강도는 감소하지만 인장 탄성률과 열전도도가 증가하는 결과가 얻어졌다. 본 연구에서는 Al-flake에 xGnP의 삽입 정도에 따라 복합체의 성질의 변화를 관찰하고자 Al-flake와 xGnP를 볼 밀링 시간에 따라 혼합하여 xGnP가 Al-flake에 부분 삽입과 완전 삽입된 두 종류의 Al-xGnP 혼성 입자를 제조한 후 PC와 압출기를 이용하여 PC/Al-xGnP 복합체를 제조하고 Al-xGnP의 함량에 따라 복합체의 기계적 성질과 열전도도를 측정하였다.

실 험

시약 및 재료. 본 연구에서 사용한 PC는 롯데첨단소재 SA-1220 제품을 구매하여 사용하였다. 입자의 평균 크기가 100 μm 인 Al-flake는 Applied Carbon Nano Technology(한국)에서 공급 받았고 xGnP(M-5)는 한화 나노텍(한국)에서 공급받아 사용하였다. xGnP의 측면치수와 두께는 각각 $\sim 5 \mu\text{m}$ 와 6-8 nm이다.

Al-xGnP 하이브리드 입자의 제조. Al-xGnP 혼성 입자를 제조하기 전에 먼저 Al-flake(97 vol%)와 xGnP(3 vol%)를 100 °C에서 5분간 건조를 한 후 볼 크기가 5 mm인 high energy 볼밀(attrition milling)에서 400 rpm의 속도로 볼밀 시간에 따라 혼합하였다. 사용된 볼밀은 폴리에틸렌 실린더형 용기에

단단한 지르코니아(zirconia) 볼을 넣어 회전시킴으로써 텀블링에 의한 충격이나 전단력, 마찰력 등을 이용하여 Al에 xGnP가 삽입될 수 있는 방법으로 혼합시간을 2시간과 5시간을 하면 두 종류의 Al-xGnP 혼성 입자가 얻어지는데 전자는 Al-flake에 부분 삽입된 Al-xGnP로 후자는 완전 삽입된 Al-xGnP로 명명하였다.

PC 복합체의 제조. 본 연구에서는 30 mm 공동회전 이축 압출기(LG Machinery, MT-30-S2-42C, $L/D=42$, $\Phi 30$, 한국)를 이용하여 Al-xGnP의 함량이 5, 10, 15, 20 wt%인 PC/Al-xGnP 복합체를 제조하였다. PC와 Al-xGnP는 질량비로 미리 계량하여 폴리에틸렌 봉투에서 전혼합(pre-mixing)을 한 후 압출기의 호퍼에 일괄투입을 하였고, 사용된 압출기의 스크류 조합은 3-kneading disc block type을 사용하였으며 압출기 배럴의 온도는 호퍼에서 다이까지 200~270 °C로 설정하였으며 스크류 속도는 80 rpm으로 고정하였다. 압출기의 다이를 빠져나온 strand를 상온의 물로 냉각하면서 나이프 커터를 이용하여 펠렛형태의 PC/Al-xGnP 복합체를 제조하였다.

특성분석. Al-flake에 xGnP의 삽입된 정도를 알아보기 위하여 투과 전자 현미경(TEM, JEM2100, JEOL, Japan)을 사용하였고 PC 복합체 형태학을 측정하기 위하여 주사 전자 현미경(SEM, JSM-6500F, JEOL, Japan)을 이용하였다. PC 복합체의 기계적 성질과 열전도도를 측정하기 위한 시편은 사출성형기(Pro-WD80, Dongsin Hydraulics Co., Ltd., Korea)를 사용하여 표준 ASTM 금형을 장착하여 앞서 압출 공정으로 제조된 펠렛을 사출기의 호퍼에 직접 투입하여 시편 형태로 제작하였다. 이때 사출 조건은 사출기의 온도는 호퍼에서 노즐까지 245~280 °C로 설정하였고 금형온도는 50 °C로 유지하였으며 냉각시간은 15초로 설정하였다. 또한 50 kN 로드셀을 사용하였고 크로스헤드 스피드는 50 mm/min로 하였으며 gage length는 100 mm로 설정하였다. 인장시험은 인스트론 만능시험기(AG-Xpkus, Shimadzu, Japan)를 사용하여 측정하였고 인장시편은 D638 규격에 따라 두께가 3.2 mm이며, 전체 길이가 165 mm이고 폭은 13 mm이며, 표점 거리가 50 mm 형태로 제조되었다. PC 복합체의 굴곡실험 또한 인스트론 만능시험기를 사용하여 측정하였고 시편은 ASTM D790 규격에 따라 두께 3.2 mm, 길이 127 mm, 그리고 폭은 12.7 mm의 직육면체 형태로 제조되었으며 크로스헤드 스피드는 5 mm/min로 고정하였다. 기계적 성질의 값은 시편 10개의 측정값을 평균 내어 나타내었다. PC 복합체의 열전도도는 laser flash method(LFA447, Netzsch, UK)를 이용하여 측정하였고 지름이 10 mm이고 두께가 0.1 mm인 디스크 형태의 시편으로 측정하였다.

결과 및 토론

하이브리드 입자의 형태학. 제조된 Al-xGnP 혼성 입자의

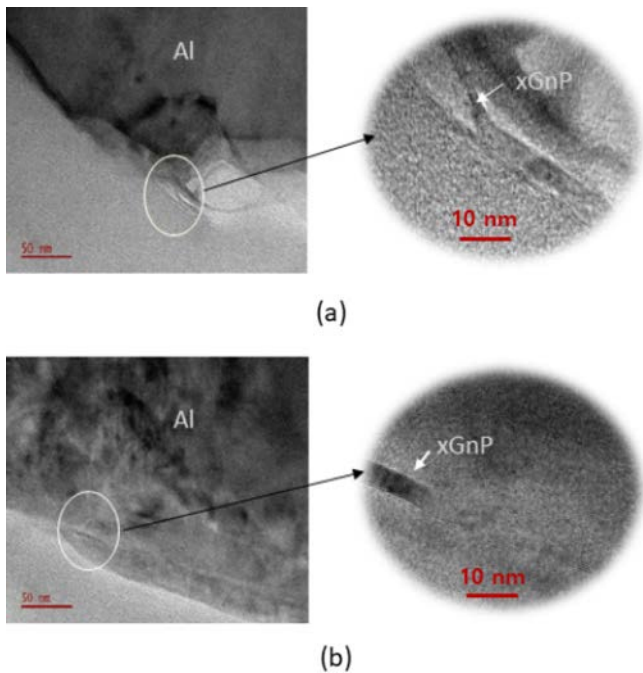


Figure 1. TEM images of (a) partially inserted; (b) fully inserted xGnP into Al-flakes.

TEM 사진을 Figure 1에 나타내었다. 밀링 시간에 따라 Figure 1(a)에 보인 것처럼 2시간의 혼합공정을 거치면 xGnP가 일부는 Al-flake에 삽입되고 나머지 부분은 Al 표면에 노출되어 있는 부분삽입 혼성 입자의 형태가 관찰되었고, 혼합시간을 5시간으로 늘리게 되면 Figure 1(b)에 보여진 것처럼 Al 내부에 xGnP 전체가 들어가 있는 완전 삽입 혼성 입자를 제조할 수 있었다. 밀링 과정에서 xGnP는 불과의 마찰에 의해서 파쇄와 층 구조가 파괴되면서 크기 및 두께가 감소하고, Al-flakes는 밀링과정에서 강한 압력을 받게 되어 냉간 용접(cold welding)에 xGnP가 Al 내부에 삽입되는 현상이 발생하고 서로 뭉치게 되어 결국 큰 덩어리를 형성하게 된다. 이때 밀링 시간이 많이 경과될수록 xGnP의 크기는 작아지고, Al flake의 크기는 냉간용접에 의해서 증가하며, Al 내에 xGnP가 더 깊이 삽입된다는 것을 알 수 있다.

PC 복합체의 기계적 성질. Figure 2는 PC/Al-xGnP 복합체의 인장강도와 인장 탄성률을 나타내고 있다. 부분 삽입된 Al-xGnP의 함량에 따라 PC/Al-xGnP 복합체의 인장강도는 PC의 55.8 MPa에서 Al-xGnP가 20 wt%들어간 PC/Al-xGnP 복합체의 47.1 MPa까지 일정하게 감소하고 있는데 그 원인은 Al-xGnP와 PC간의 접착력이 약하여 복합체의 인장강도에 영향을 주기 때문이다. 즉, 인장강도는 파괴에 대한 물질의 저항을 측정하는데 이러한 약한 계면 접착력은 기존의 균열이 있는 것과 같은 효과가 있다. Al-xGnP의 함량이 많아지면 균열 밀도가 높아지게 되고 결국 인장강도에 역효과를 나타나게 된다. 이 결과는 Figure 3에서 보이는 PC/Al-xGnP

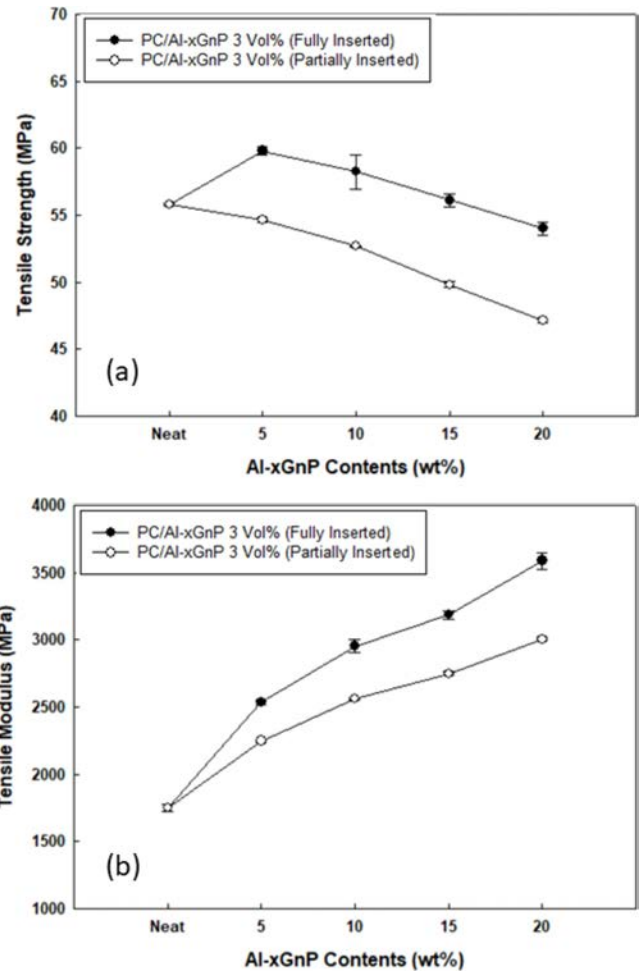


Figure 2. (a) Tensile strength; (b) tensile modulus of the PC/Al-xGnP composites with the content of Al-xGnP.

복합체의 파단면을 보이는 SEM 사진에서도 알 수 있다. Figure 3(a)는 부분적으로 삽입된 PC/Al-xGnP의 SEM 사진을 보여주고 있는데 Al-xGnP와 PC와의 약한 계면 접착력으로 인하여 큰 덩어리의 Al-xGnP가 PC 매트릭스로부터 많이 빠져나온 것을 볼 수 있다. 완전 삽입된 xGnP를 포함하는 PC/Al-xGnP 복합체의 인장강도는 Al-xGnP의 함량에 따라 5 wt%에서 20 wt%까지 인장강도가 감소하는데 그 값은 PC와 비슷하거나 더 높은 값을 보여주고 있다. 특히 Al-xGnP 5 wt%에서 59.8 MPa의 가장 높은 인장강도 값을 나타내고 있고 Al-xGnP의 함량이 증가할수록 일정하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체보다 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 인장강도가 같은 함량에서 더 높은 것은 Figure 3(b)에서 보여주는 xGnP가 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 SEM 사진에서도 알 수 있다. 비록 Al-xGnP와 PC의 약한 계면 접착력은 보이지만 부분 삽입된 Figure 3(a)와는 다르게 PC 매트릭스로부터 덜 빠져나

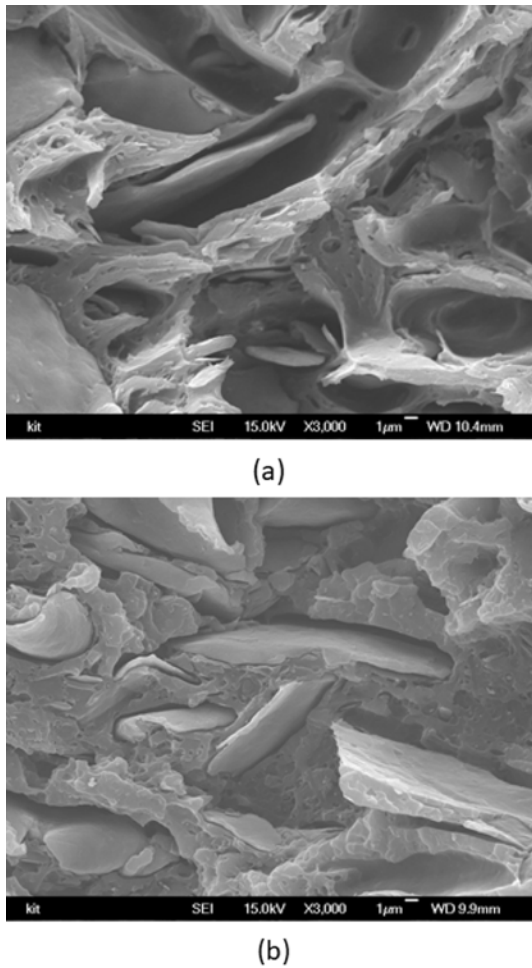


Figure 3. SEM images of (a) partially inserted; (b) fully inserted PC/Al-xGnP composites at loading of 20 wt% Al-xGnP.

오는 것을 알 수 있다. Figure 2(b)에서 보이고 있는 PC/Al-xGnP 복합체의 인장 탄성률은 Al-xGnP의 함량에 따라 일정하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 PC 대비 분산상으로 존재하는 알루미늄이 훨씬 강직(rigid)하기 때문에 나타나는 현상으로 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 인장 탄성률은 PC의 1751 MPa에서 Al-xGnP가 20 wt% 함유된 복합체의 3005 MPa로 72%의 증가를 보였고 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 경우는 Al-xGnP가 20 wt%에서 3589 MPa로 105%의 증가를 나타내어 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 인장 탄성률이 더 높게 측정되었다. 이러한 결과는 부분 삽입된 Al-xGnP 혼성 입자가 압출기에서 PC와 복합화 할 때 높은 전단속도에 의해 일정 부분 xGnP가 Al-flake로부터 빠져나오는 현상으로 설명할 수 있다. 이전에 발표된 PC/Al-CNT 복합체의 경우에서도 압출공정에서 CNT가 Al-flake로부터 빠져나와 복합체의 기계적 성질에 영향을 준다고 보고하였다. 물론 완전 삽입된 Al-xGnP 혼성 입자의 경우도 PC와의 압출공정에서 일부 xGnP가 빠져나오지만 그 정도는 부분 삽입

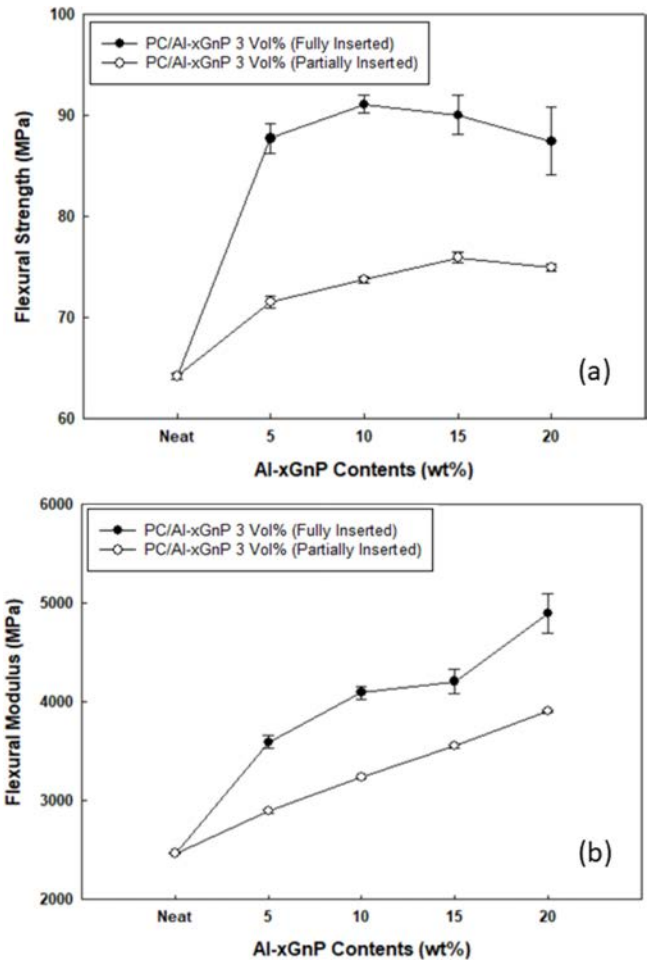


Figure 4. (a) Flexural strength; (b) flexural modulus of the PC/Al-xGnP composites with the content of Al-xGnP.

된 경우보다 적고 그 결과 같은 함량에서 더 높은 인장 탄성률 값이 얻어진다고 판단된다.

Figure 4는 PC/Al-xGnP 복합체의 굴곡강도와 굴곡 탄성률을 보이고 있다. PC/Al-xGnP 복합체의 굴곡강도의 경우 인장강도와 비슷하게 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체보다 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 굴곡강도 값이 크게 나타나고 있다. 인장강도와 달리 흥미로운 것은 일정한 Al-xGnP의 함량에서 굴곡강도의 최고값이 얻어진다는 것이다. 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체에서는 Al-xGnP의 함량이 15 wt%에서 75.9 MPa의 최고값을 나타내고 그 이상에서 감소하는 경향을 보이는 반면에 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체에서는 10 wt%에서 91.1 MPa의 최고값을 나타내고 그 이상의 함량에서 일정하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 굴곡강도의 최고값을 비교해보면 PC의 굴곡강도 값인 64.1 MPa에 비해 각각 18%와 42%의 증가를 보여주고 있다. PC/Al-xGnP 복합체의 인장강도에 비해 굴곡강도가 증가하는 것은 Al-flake 및 xGnP의 판상 구조에 기인한다고 판단된다. 부분 삽입된

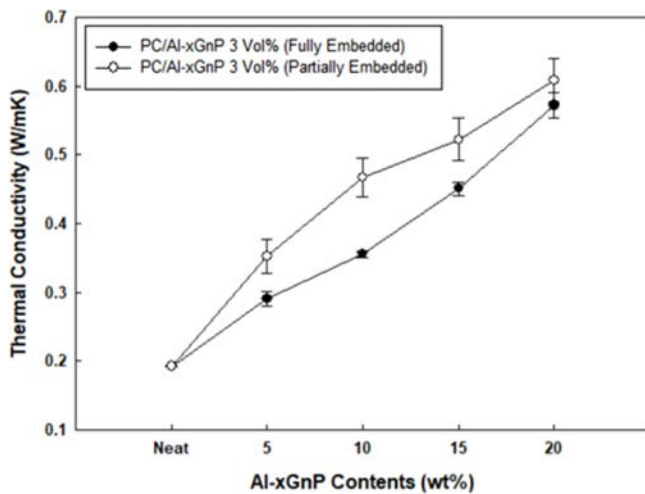


Figure 5. Thermal conductivity of PC/Al-xGnP composites with the content of Al-xGnP.

PC/Al-xGnP 복합체보다 완전 삽입된 복합체의 굴곡강도 값이 큰 것은 앞에서 언급 했듯이 압출공정 중에 xGnP가 Al-flake로부터 빠져나왔기 때문이라 생각한다. 이렇게 빠져나온 xGnP는 서로 뭉치게 되어 굴곡강도에 영향을 미치게 되는데 상대적으로 완전 삽입된 xGnP는 부분 삽입된 xGnP에 비해 빠지는 정도가 약하여 같은 Al-xGnP 함량에서 상대적으로 높은 굴곡강도의 값을 보이게 된다. 그러나 굴곡강도의 최고 점을 지나 감소하는 것은 그 함량 이상에서는 빠지는 xGnP의 양이 많아지고 결국 서로 뭉치게 되어 굴곡 강도의 감소로 나타난다. PC/Al-xGnP 복합체의 굴곡 탄성률은 인장 탄성률과 같이 Al-xGnP 함량에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체는 PC의 2466 MPa에서 함량이 20 wt%인 3907 MPa 까지 일정하게 증가하고 있고 완전 삽입된 경우는 더 크게 증가하여 함량이 20 wt%에서 4897 MPa까지 99% 증가하였다. 순수 PC 대비 기존 PC/xGnP 또는 PC/GnP 복합체의 경우^{5,6} 인장 탄성률의 증가가 GnP 7 wt% 기준으로 50~52% 정도 증가하였는데 본 연구에서 사용된 Al-xGnP 하이브리드 입자를 사용한 경우 동일한 입자함량 7 wt%에서 인장 탄성률이 60%까지 증가함을 확인할 수 있었고 물성 향상에 하이브리드 입자를 사용하는 것이 효과적임을 확인하였다.

열전도도. Figure 5는 Al-xGnP 함량에 따라 PC/Al-xGnP 복합체의 열전도도를 나타내고 있다. 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체는 PC의 0.19 W/mK에서 Al-xGnP 함량이 20 wt%에서 0.57 W/mK까지 증가하였고 부분 삽입된 경우는 같은 함량에서 0.61 W/mK까지 증가하였다. 흥미로운 것은 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체의 열전도도가 완전 삽입된 것보다 더 높게 나온다는 것이다. 이러한 결과는 부분 삽입된 xGnP 나 일부 압출공정에서 빠져나온 xGnP가 Al-flake 간의 네트워크를 형성하고 열전도 경로(thermal conduction path)를 형성하고 완전 삽입된 경우에는 xGnP가 알루미늄 내부에 존재하기 때문에 열전달 경로를 형성할 수 없기 때문이라고 생각되어 진다.

결론

본 연구에서는 Al-flake와 xGnP를 하이브리드하여 입자를 제조한 후 PC와 복합화하여 PC/Al-xGnP 복합체를 제조하였고 복합체의 기계적 성질과 열전도도를 측정하였다. Al-xGnP 혼성 입자를 제조할 때 불 밀링 시간에 따라 xGnP가 Al-flake에 부분 삽입과 완전 삽입된 Al-xGnP 혼성 입자의 제조가 가능하였다. 부분 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체는 완전 삽입된 복합체보다 열전도도는 우수한 결과를 나타내었고 기계적인 성질에서는 완전 삽입된 PC/Al-xGnP 복합체가 우수하였다. PC에 xGnP를 직접 분산시키는 것은 어렵지만 Al-flake와 혼성화하면 간접적으로 xGnP의 분산을 용이하게 하고 나아가 기계적 성질과 열전도도가 우수한 PC 복합체를 얻을 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 금오공과대학 학술연구비에 의하여 연구된 논문으로 이에 감사드립니다(2018-104-111).

참고 문헌

- Chung, D. D. L. Review Graphite. *J. Mater. Sci.* **2020**, *37*, 1475-1489.
- Kim, H.; Macosko, C. Processing-property Relationships of Polycarbonate/Graphene Composites. *Polymer* **2009**, *50*, 3797-3809.
- Yoonessi, M.; Gaier, J. R. Highly Conductive Multifunctional Graphene Polycarbonate Nanocomposites. *ACS Nano* **2010**, *4*, 7211-7220.
- Müller, M. T.; Hilarius, K.; Liebscher, M.; Iellinger, D.; Alig, I.; Pötschke, P. Effect of Graphite Nanoplate Morphology on the Dispersion and Physical Properties of Polycarbonate Based Composites. *Materials* **2017**, *10*, 545-567.
- Oyarzabal, A.; Christiano-Tassi, A.; Laredo, E.; Newman, D.; Bello, A.; Etxebarria, A.; Equiazabal, J. L.; Zubiter, M.; Mugica, A.; Müller, A. J. Dielectric, Mechanical and Transport Properties of Bisphenol a Polycarbonate/graphene Nanocomposites Prepared by Melt Blending. *J. Appl. Polym. Sci.* **2017**, *134*, 44654-44666.
- King, J. A.; Via, M. D.; Morrison, F. A.; Wiese, K. R.; Beach, E. A.; Cieslinski, M. J.; Bogucki, G. R. Characterization of Exfoliated Graphite Nanoplatelets/Polycarbonate Composites: Electrical and Thermal Conductivity, and Tensile, Flexural, and Rheological Properties. *J. Compos. Mater.* **2011**, *46*, 1029-1039.
- Zakaulla, M.; Parveen, F.; Amreen; Harish; Ahmad, N. Artificial Neural Network Based Prediction on Tribological Properties of Polycarbonate Composites Reinforced with Graphene and Boron

- Carbide Particle. *Mater. Today-Proc.* **2019**, 11, 296-304.
8. Steurer, P.; Wissert, R.; Thomann, R.; Mühlhaupt, R. Functionalized Graphenes and Thermoplastic Nanocomposites Based upon Expanded Graphite Oxide. *Macromol. Rapid Commun.* **2009**, 30, 316-327.
 9. Potts, J. R.; Murali, S.; Zhu, Y.; Zaho, X.; Ruoff, R. S. Microwave-Exfoliated Graphite Oxide/Polycarbonate Composites. *Macromolecules* **2011**, 44, 6488-6495.
 10. Gedler, G.; Antunes, M.; Realinho, V.; Velasco, J. I. Thermal Stability of Polycarbonate-Graphene Nanocomposite Foams. *Polym. Degrad. Stab.* **2015**, 97, 1297-1304.
 11. Via, M. D.; King, J. A.; Keith, J. M.; Bogucki, G. R. Electrical Conductivity Modeling of Carbon Black/Polycarbonate, Carbon Nanotube/polycarbonate, and Exfoliated Graphite Nanoplatelet/Polycarbonate Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* **2012**, 124, 182-189.
 12. Yoon, S. H.; Jung, H. T. Grafting Polycarbonate Onto Graphene Nanosheets: Synthesis and Characterization of High Performance Polycarbonate-Graphene Nanocomposites for ESD/EMI Applications. *RSC Adv.* **2017**, 7, 45902-45910.
 13. Hwang, S. H.; Bang, D. S.; Yoon, K. H.; Park, Y. B.; Lee, D. Y.; Jeong, S. S. Fabrication and Characterization of Aluminum-Carbon Nanotube Powder and Polycarbonate/Aluminum-Carbon Nanotube Composites. *J. Compos. Mater.* **2010**, 44, 2711-2722.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.