Polymer(Korea), Vol. 41, No. 2, pp. 189-195 (2017)
https://doi.org/10.7317/pk.2017.41.2.189
ISSN 0379-153X(Print)
ISSN 2234-8077(Online)

폴리카보네이트/그라파이트 인터칼레이션 컴파운드 복합재료의 음향학적 특성 및 열적 특성 연구

배영한 · 권태순* · 유민지 · 이병찬**,† · 김성룡†
한국교통대학교 나노화학소재공학과, *한국철도기술연구원 철도안전연구실, **한국교통대학교 환경공학과
(2016년 8월 15일 접수, 2016년 10월 4일 수정, 2016년 10월 15일 채택)

Acoustic Characteristics and Thermal Properties of Polycarbonate/(Graphite Intercalation Compound) Composites

Young-Han Bae, Tae-Soon Kwon*, Min-Ji Yu, Byung-Chan Lee,†, and Sung-Ryong Kim†**
Department of Polymer Science and Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju 27469, Korea
**Railroad Safety Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Museum Road, Uiwang, Gyeonggi-do 16105, Korea*
***Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju 27469, Korea*
(Received August 15, 2016; Revised October 4, 2016; Accepted October 15, 2016)

초록: 폴리카보네이트(PC) 수지에 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드(GIC) 필러를 용융 혼련하여 복합재료를 제조하여 구조, 흡음계수, 음투과손실, 열전도도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. GIC 함량을 증가시킴에 500~4000 Hz의 전체 주파수 영역에서 흡음계수와 음투과손실이 증가하였다. 올릴아민으로 표면처리된 GIC를 포함한 PC 복합재료는 미처리 GIC를 포함하는 PC 복합재료보다 상대적으로 적은 기공과 매끈한 파단면을 보였으며, 높은 흡음계수와 열전도도를 보였다. 순수 PC에 비하여 PC/GIC(20 wt%) 복합재료의 흡음계수는 고주파 영역인 4000 Hz에서 증가하였으며, PC/GIC(20 wt%) 복합재료의 4000 Hz 기준 흡음계수, 음투과손실, 열전도도는 각각 0.08, 34 dB, 1.12 W/mK였다. GIC 함량이 20 wt%로 증가함에 따라 2000 Hz 주파수 영역의 음투과손실이 순수 PC의 12 dB에서 39 dB로 급격히 증가하였다. 본 연구를 통하여 낮은 면밀도를 가지는 PC/GIC 복합재료가 스테인레스강과 비교하여 경량성과 동시에 흡음 및 차음을 요구하는 응용에 효율적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract: Graphite intercalation compound (GIC) contained polycarbonate (PC) composites were prepared by melt mixing and the effects of GIC and its surface treatment using oleylamine (OA) on the morphology and properties of the polycarbonate based composites were examined. As increasing the GIC contents, the sound absorption coefficient and sound transmission loss of the PC/GIC composites increased over the frequencies of 500~4000 Hz. The OA treatment of GICs improved the interfacial bonding and dispersion of GICs in the PC matrix and it allowed less voids and the smoother fractured surfaces compared to the PC composites with the untreated GIC fillers. Compared to the bare PC, the PC/GIC (20 wt%) composites showed the higher absorption coefficient at 4000 Hz. The absorption coefficient at 4000 Hz, sound transmission loss, and thermal conductivity of the PC/GIC (20 wt%) composites were 0.08, 34 dB, and 1.12 W/mK, respectively. At 20 wt% of GIC loading, the sound transmission loss at 2000 Hz increased to 39 dB from 12 dB of the bare PC. These results indicate that the PC/GIC composites with lower surface density could be more suitable compared to the stainless steel in the fields that require the sound absorption and sound blocking with a light weight.

Keywords: sound absorption coefficient, sound transmission loss, graphite intercalation compound, polycarbonate, thermal conductivity.

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: srkim@ut.ac.kr; bclee@ut.ac.kr
©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

서 론

수송수단의 발전과 고속화가 진행되면서 소음에 대한 관심이 커지고 있으며, 차량 내부의 적절한 소음관리는 쾌적성에 매우 중요하다. 특히, 자동차나 철도와 같은 교통분야에서는 소음문제를 해결하기 위하여 다각적인 시도가 이루어지고 있으며 새로운 흡음재 및 차음재에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.[1,2] 차량의 부품 및 내장재에 다양한 재질과 구조의 재료를 사용함으로써, 외부 소음을 차단하고 내부 소음을 억제시켜 승차감과 실내 정숙성을 향상시킬 수 있다.[3,4] 운송차량의 실내소음은 외장재, 내장재, 유리창들이 소음원으로부터 입사되는 음을 차단하고 음을 흡수하는가에 영향을 받으며, 소음성능을 나타내는 커다란 기준으로는 흡음계수와 투과손실이 있다. 차량의 쾌적한 승차 환경을 위하여 상이한 구조와 면밀도를 가지는 흡음재 및 차음재를 적용하는 연구가 진행되어 왔다.[4] 자동차용 흡차음재는 흡음, 차음 특성을 가지기 위해 일정 수준의 비중을 유지해야 하기 때문에 경질 충전제 등을 수지에 혼합하여 사용한다.[5] 하지만, 무거운 충전제를 혼합하면 복합재료의 중량을 증가시키는 문제가 있기 때문에 가벼운 중량을 유지하면서도 흡음 및 차음 성능을 향상시키는 고분자 복합체 연구가 진행되고 있다. Kim 등은 용액 블렌딩법으로 카본나노튜브를 폴리프로필렌에 혼합하여 복합재료를 제조하여 카본나노튜브의 함량변화에 따른 음투과손실 변화를 관찰하였으며,[6] Wu 등은 탄소나노튜브를 포함하는 전기방사된 폴리비닐리덴플루오라이드(PVDF) 멤브레인의 흡음특성에 미치는 영향을 연구하였다.[1] Song 등은 자동차용 흡음재로 초극세사를 사용하여 진동소음과 타이어 소음, 하체 소음, 엔진음 등의 감쇄에 미치는 영향을 보고하였다.[2]

폴리카보네이트(PC)는 비중이 1.2인 열가소성 고분자로 플라스틱 중 가장 강인한 특성을 보이고 유리전이온도가 150 ℃로 높아 전기전자 및 자동차 부품 용도로 많이 사용되고 있는 엔지니어링 플라스틱이다. 그래핀은 강도, 전기전도도 뿐만 아니라 열전도도가 ~5000 W/mK 정도로 매우 우수한 것으로 알려져 있는 매력적인 소재로 최근의 연구들은 그래핀이 다양한 용도에 사용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.[7-9] 그래핀으로부터 탄소나노튜브, 플러렌, 그라파이트 옥사이드, 그라파이트, 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드(graphite intercalation compound(GIC)) 등을 만들 수 있고, 이러한 다양한 형태의 탄소계 소재를 나노필러로 사용하여 고분자의 기계적, 전기적, 물리적 성질을 향상시키려는 많은 연구가 진행되어 왔다.[10-13] 나노필러를 고분자 매트릭스에 적용한 연구에서 나노필러의 넓은 면적, 나노필러간의 반데르발스 인력과 파이-파이 결합 등으로 응집되는 경향이 있어 매트릭스 내의 나노필러 분산이 어려워서 복합재료의 산업적 적용에 문제가 되는 것으로 알려져 있다.[13-15] 따라서 탄소소재를 적용한 복합재료가 상용화되기 위해서는 탄소소재의 화학적 개질과 이로 인한 우수한 분산과 나노필러와 매트릭스 사이의 강한 결합이 필수적이다.[16]

탄소계 소재 중 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드는 그라파이트 플레이크를 300 ℃ 이상에서 팽창시켜 제조하는 다공성 소재로 겉보기 밀도가 0.58 g/cm^{3}로 낮고, 상대적으로 가격이 저렴하여 상업화가 가능한 소재로 우수한 전기전도성 및 열전도성을 가지기 때문에 고분자에 적용하는 상당한 연구가 진행되어 왔으나,[17-20] 이를 적용하여 복합재료의 소음 특성을 고찰한 연구는 거의 보고되어 있지 않다. Zheng 등은 팽창된 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드를 폴리메틸메타아크릴레이트와 용액 블렌딩으로 복합재료를 제조하여 1 wt%의 필러 함량으로도 전기전도도가 급격히 증가하는 것을 보고하였으나 복합재료의 열전도도나 음향학적 특성에 대해서는 언급하지 않았다.[20]

본 연구에서는 PC를 기재로 사용하고 GIC를 충전제로 사용하여 압출과 사출공정에 의해 복합재료를 제조하고 복합재료의 구조, 음향학적 특성, 열적 특성 등을 측정하고, 흡음 및 차음재로의 적용 가능성을 고찰하였다. 또한 올릴아민으로 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드 필러를 표면처리하여 복합재료의 계면결합, 흡음계수, 음투과손실, 열전도도, 열적안정성에 미치는 영향을 연구하였다.

실 험

실험 재료 및 시료 준비. 본 연구에서 사용한 매트릭스로는 용융흐름지수가 14 g/10 min이고, 열전도도가 0.19 W/mK인 열가소성 고분자인 폴리카보네이트(TRIREX 3022IR, Samyang Co., Korea)를 사용하였다. 필러로는 판상구조를 갖는 약 200 μm 너비의 탄소계 필러인 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드(SFF, Chuetsu Graphite Works Co., Japan)를 고온에서 팽창시켜 사용하였다. 이전에 보고된 실험과 유사하게 GIC를 400~450 ℃의 온도를 유지한 머플 전기로(DMF-3T, Labhouse Co., Korea)에서 10분 동안 가열하여 탄소층들을 수 백배 팽창시켜 5~15 μm 정도의 벌집과 같은 기공 구조를 만들고,[18] 9 M의 질산으로 24시간 담가 GIC 표면에 기능성기를 도입하였다.[17]

PC 매트릭스 내에서 GIC 필러를 소수성으로 표면처리하여 분산을 용이하게 하고, PC 수지와의 결합을 향상시키기 위하여 Figure 1과 같이 올릴아민(oleylamine(OA), O7805, Sigma Aldrich Co., USA)으로 표면처리하여 필러로 사용하였다. 올릴아민 3 wt%와 에탄올을 바이알에 혼합한 후 상온에서 600 rpm으로 24시간 교반 후 에탄올과 증류수로 세척한 후 건조하였다. PC/GIC 복합재료를 제조하기 위하여 Figure 2와 같은 흐름도를 바탕으로 해서 시료를 압출 및 사출 가공하여 사용하였다. 미처리 GIC 필러 및 표면처리된 GIC 필러를 5, 10, 15, 20 wt%의 함량으로 PC 펠렛과 혼합한 후, 이축압출

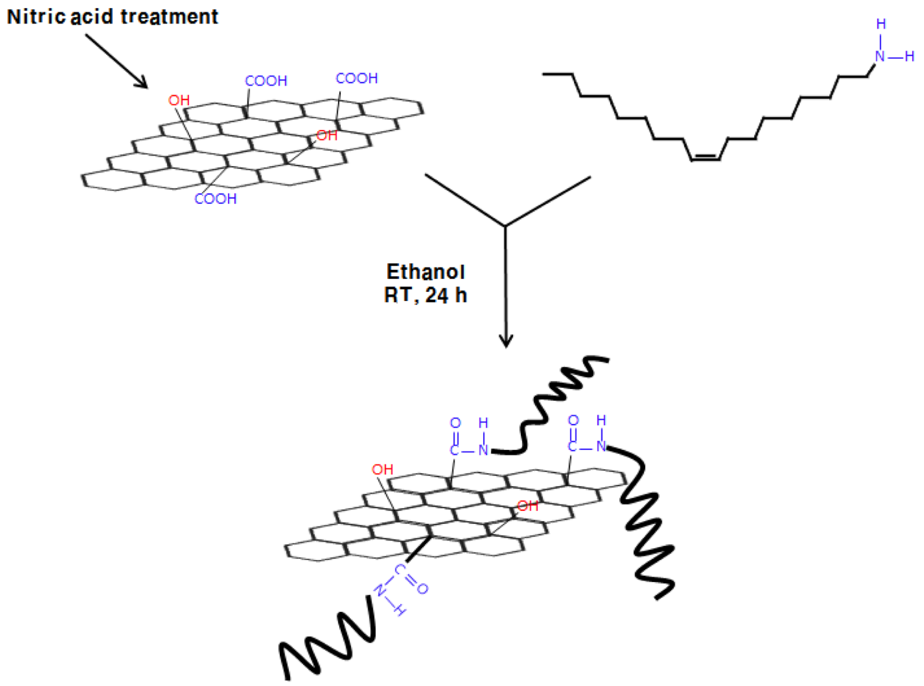

Figure 1. Schematic steps to prepare a hydrophobic GIC using oleylamine.

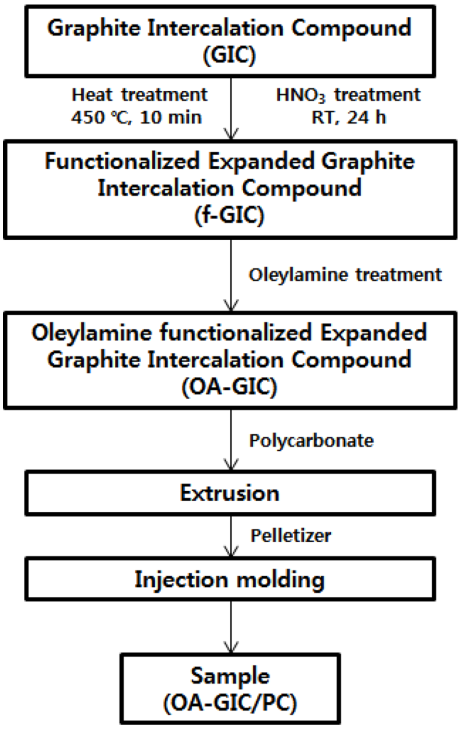

Figure 2. Flow chart of preparation of GIC/PC composites.

기(BA-11, Bautek Co., Korea)로 용융 혼련하였다. 사용한 압출기의 스크류 지름은 30 mm였고 길이/지름(L/D) 비는 40이었다. 고분자 압출 가공의 스크류 회전수는 분당 120회, 배럴의 온도는 240~310 ℃로 설정하였다. 용융된 스트랜드(strand)는 펠렛타이저를 이용하여 펠렛 형태로 만들었으며, 80 ℃에서 24시간 건조 후 사용하였다. 한편, GIC 필러의 함량이 20 wt% 이상에서는 GIC의 높은 팽창률과 낮은 벌크밀도로 인하여 압출을 통한 스트랜드 형성이 어려웠다.

PC/GIC 복합재료의 흡음계수, 음투과손실, 열전도도 등을 측정하기 위하여 형체력이 15톤인 사출기(WL-V-15, Wonil Hydraulic Co., Korea)를 이용해서 시편(직경 50 mm, 두께 2.1 mm)을 제조하였다. 사출가공의 조건으로 보압은 20~100 kg_f/cm^2, 사출기 배럴온도는 280~300 ℃, 사출시간은 3초, 냉각시간은 20초였다. 순수 PC와 GIC 필러를 20 wt%까지 포함하는 PC 복합재료를 제조하였으며 각 함량에서 5개의 시료를 측정하여 평균값을 사용하였다. 또한 PC 복합재료와의 음향학적 특성 비교를 위하여 스테인레스강(SUS304)을 가공하여 사용하였다.

특성 분석. 필러의 형상 및 크기뿐만 아니라 복합재료의 파단면 분석을 통한 필러의 분산과 필러와 매트릭스 사이의 계면결합이 복합재료의 열전도도, 흡음계수, 음투과손실에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전계형 주사전자현미경(FESEM, JSM 6007-F, JEOL Co., Japan)을 사용하였다. 시료는 액체 질소 분위기에서 파단시켜 준비하였고 시료 표면의 전하대전으로 인한 손상을 방지하기 위하여 시료를 스퍼터 코터를 이용하여 수십 nm의 Pt 전처리 코팅을 한 후 관찰하였다. 시료의 열전도도를 측정하기 위하여 레이저 섬광법을 이용하는 열특성분석기(TC-9000, Ulvac Co., Japan)를 이용하였으며,

Table 1. Specification of Samples

Specification	Stainless steel	Bare PC	PC/GIC (10 wt%)	PC/GIC (10 wt%) treated	PC/GIC (20 wt%)	PC/GIC (20 wt%) treated
Diameter (mm)				45		
Mass (g)	37.18	4.13	4.09	4.10	4.10	4.11
Thickness (mm)	2.97	2.23	2.15	2.18	2.15	2.16
Surface density (kg/m^2)	23.38	2.60	2.56	2.57	2.57	2.58
Density (g/cm^3)	7.874	1.192	1.225	1.227	1.289	1.277

열전도도 측정시편은 사출품을 추가적인 가공 없이 사용하였다. 복합재료의 온도에 의한 열화 현상과 중량 변화를 관찰하기 위하여 열중량분석기(TGA, SDT2960, TA Instruments Co., USA)를 이용하여 질소 분위기 조건에서 상온에서 800 °C까지 10 °C/min의 승온 속도로 측정하였다. 복합재료의 흡음계수 및 투과손실을 측정하기 위해 음향 임피던스 튜브(TMS-1000, SM Instruments Co., Ltd, Korea)를 사용하였다.

시료의 소음특성은 흡음계수와 투과손실로 표시되며 흡음계수는 흡음재의 음향학적 지표이다. 복합재료의 흡음계수를 측정하기 위하여 관내법(KS F 2814-1)에 의한 재료의 수직입사 흡음계수 측정방법을 사용하였다. 관내법은 비교적 작은 크기의 시료를 사용하여 수직 입사음에 대한 흡음계수를 측정하는 장점이 있다. 장치 구조와 측정방법을 간단히 설명하면, 내부 직경과 길이가 각각 45 mm, 1 m인 임피던스관 내부에 마이크로폰을 설치하고, 스피커에서 발생되는 음의 진행방향과 수직하게 디스크 형태의 시편을 설치하여 측정한다.[21] 흡음계수는 음원에서 나온 파에 대하여 시료 표면에 입사되는 입사파와 반사파를 측정하여 계산할 수 있다. 복합재료의 음투과손실(sound transmission loss, TL)은 시료를 투과하는 음투과량에 반비례한다. 본 연구에서는 관내법을 이용하여 음투과손실을 측정하였으며, 수송차량이나 건물에 사용되는 재료의 소음특성에 크게 영향을 미치는 500~4000 Hz 주파수 영역에서 실험을 진행하였다. 흡음계수 및 투과손실 측정을 위하여 사용한 시편의 규격을 Table 1에 나타내었다.

결과 및 토론

폴리카보네이트 매트릭스 내에 GIC가 어떻게 분산되었는지를 관찰하기 위해 주사전자현미경으로 관찰하였다. Figure 3은 GIC를 포함하는 PC 복합재료의 주사전자현미경 사진이다. 고온에서 팽창된 다공성 GIC의 특성 및 구조는 이전의 논문에서 찾아볼 수 있다.[18] 고온에서 수 백배 팽창된 그라파이트 인터칼레이션 컴파운드는 수 μm의 기공들을 포함하며, 압출과정에서 높은 전단 응력에 의해 수 십층 이하의 그래핀이 쌓여진 얇은 판상구조(platelet)로 박리되며 매트릭스와 혼합하게 된다. 이와 같은 형상은 팽창된 GIC를 폴리메틸메타아크릴레이트와 용액블렌딩한 경우와 유사하다.[20]

Figure 3(a)와 3(b)는 각각 20 wt%의 미처리된 GIC와 OA 처리된 GIC를 포함하는 PC 복합재료의 파단면 이미지이다. 표면처리 유무와 관계없이 압축과정에서의 심한 전단 응력에 의해 전체적으로 팽창된 GIC 필러가 균일하게 PC 매트릭스 내부에 고르게 분산된 것을 볼 수 있다. Figure 3(b)는 3(a)에 비해 상대적으로 적은 수의 기공이나 결함들을 포함하는 것을 볼 수 있다. 표면처리 유무에 의한 파단면 이미지 차이를 배율이 높은 Figure 3(c)와 3(d)에서 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있는데, Figure 3(c)는 Figure 3(d)에 비하여 거친 파단면을 보여주고 있다. 이는 OA 처리된 GIC를 포함하는 복합재료의 필러와 매트릭스의 결합이 양호하고, 높은 파괴에너지를 필요로 하는 구조임을 시사한다. 공기의 매우 낮은 열전도도로 인해 복합재료 내부에 존재하는 기공은 열전도도 향상에 매우 좋지 않은 영향을 미치는데 기공을 포함하지 않고 분산이 좋은 복합재료(Figures 3(b), 3(d))는 필러-필러 사이의 열적 접촉을 용이하게 하여 열이 효율적으로 전달되는 구조를 가지는 것으로 보인다.[19,22]

나노필러인 GIC 함량 및 OA 처리 유무에 따른 복합재료의 열전도도를 Figure 4에 나타내었다. 순수 PC의 경우 열전도도는 0.19 W/mK으로 일반적인 무정형 고분자들과 유사한 낮은 열전도도를 보여주지만, GIC의 함량이 증가함에 따라 PC 복합재료의 열전도도가 급격히 상승하였다. PC/GIC(10 wt%) 복합재료는 순수 PC에 비해 약 4배 이상의 열전도도를 보였으며, 미처리 GIC와 OA 표면처리한 GIC를 포함하는 PC 복합재료의 열전도도는 각각 0.74, 0.81 W/mK가 되어 OA로 표면처리한 GIC를 포함하는 복합재료의 열전도도가 약 10% 높음을 알 수 있었다. 복합재료의 높은 열전도도는 PC 매트릭스 내부에서 열전도도가 높은 GIC 필러들이 3차원적으로 서로 연결되는 형태를 가져 열 전달 네트워크를 형성하였기 때문으로 볼 수 있다.[23] Figure 3(b)와 3(d)에서 관찰할 수 있듯이 OA로 표면처리를 함으로써 GIC 표면이 소수성으로 변하여 소수성인 PC 매트릭스와 보다 높은 계면 결합과 상용성을 가지게 되어 복합재료의 열전도도가 추가적으로 상승한 것으로 보인다. 이와 같은 표면처리 효과는 Qin 등이 다중벽 탄소나노튜브를 아민으로 처리한 후 폴리설폰에 혼합하여 복

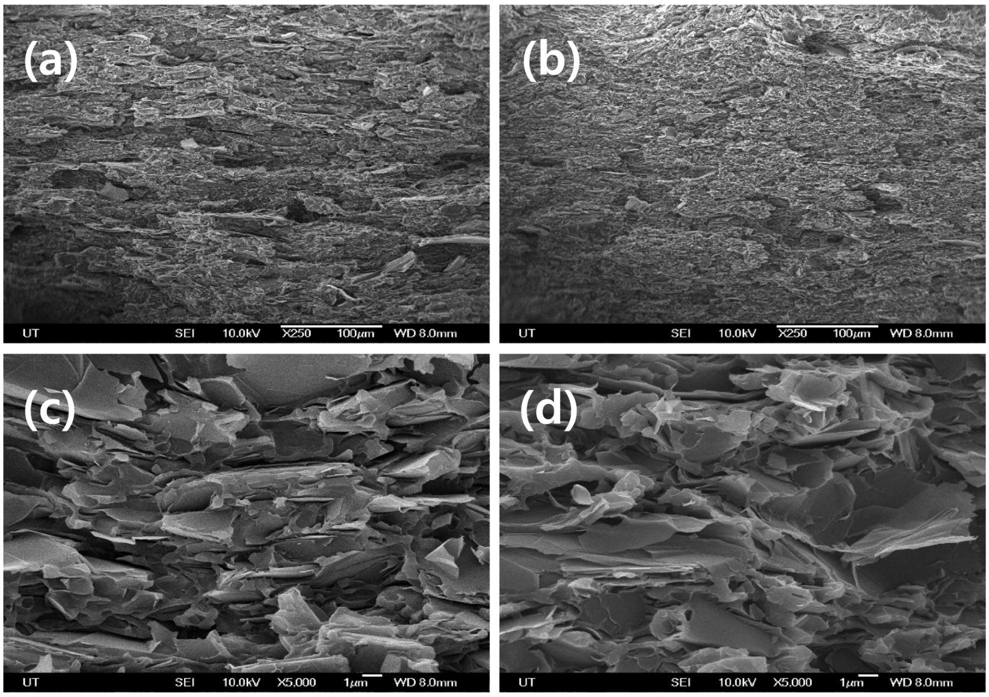

Figure 3. FESEM morphologies of (a) PC (80 wt%)/GIC (20 wt%) composites (×250); (b) PC (80 wt%)/OA-GIC (20 wt%) composites (×250); (c) PC (80 wt%)/GIC (20 wt%) composites (×5000); (d) PC (80 wt%)/OA-GIC (20 wt%) composites (×5000).

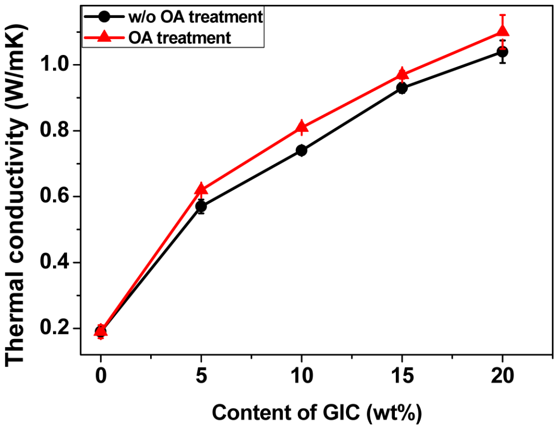

Figure 4. Thermal conductivity of PC composites as a function of GIC filler loading with and without OA treatment.

합재료의 전기전도도가 급격히 증가함을 보고한 결과와 유사하다.[24]

Figure 5(a)는 순수 PC와 GIC 함량 및 OA 표면처리에 의한 PC 복합재료 및 스테인레스강의 주파수 변화에 따른 흡음계수를 보여주고 있다. 스테인레스강을 포함한 모든 복합재료 조성에서 0.1 이하의 낮은 흡음계수를 나타내었으며, 모든 조성의 PC/GIC 복합재료에서 스테인레스강보다 높은 흡음계수를 나타내었다. GIC 함량이 증가함에 따라 복합재료의 흡음계수는 점차적으로 증가함을 보였으며, 같은 GIC 필러의 함량에서 OA 표면 처리를 한 경우에 대부분의 주파수 구간에서 높은 흡음계수를 나타내었다. 특히 20 wt%의 GIC가 포함된 복합재료는 고주파수 영역에서 다른 시료에 비해 상대적으로 효과적인 흡음특성을 보였다. GIC가 팽창하면서 형성된 기공들이 복합재료 내부에 존재하여 흡음특성에 크게 기여하는 것으로 추정할 수 있다.

PC/GIC(20 wt%) 복합재료의 흡음계수는 500~2000 Hz 주파수 영역에서는 순수 PC에 비해 비슷하나 고주파수 영역인 4000 Hz 주파수 영역에서는 0.03 정도 높은 값을 가졌다. 한편, 스테인레스강의 흡음계수는 순수 PC와 비교하여 저주파에서는 작으나 고주파에서는 증가하여 전체적으로 비슷한 경향을 보인다. Table 1에서 보듯이 팽창 GIC의 함량이 증가함에도 복합재료의 면밀도는 비슷한 값을 가지는데, 비슷한 면밀도에서 높은 흡음계수를 가지는 것은 수송차량의 내장재나 부품으로 적용시 경량화에 유리하다.

Figure 5(b)는 스테인레스강과 GIC 함량 및 표면처리에 따른 PC 복합재료의 차음 특성을 보여주고 있다. 재료의 차음특성은 식 (1)에 나타난 음의 투과손실(TL)로 표시할 수 있다.

$$\mathrm{TL} = 10 \cdot \log(1/\tau) \tag{1}$$

식 (1)에서 τ는 음의 투과율로 입사음의 세기에 대한 투과음의 세기이다.

본 연구에서 GIC 함량이 증가할수록 투과손실 값은 전반

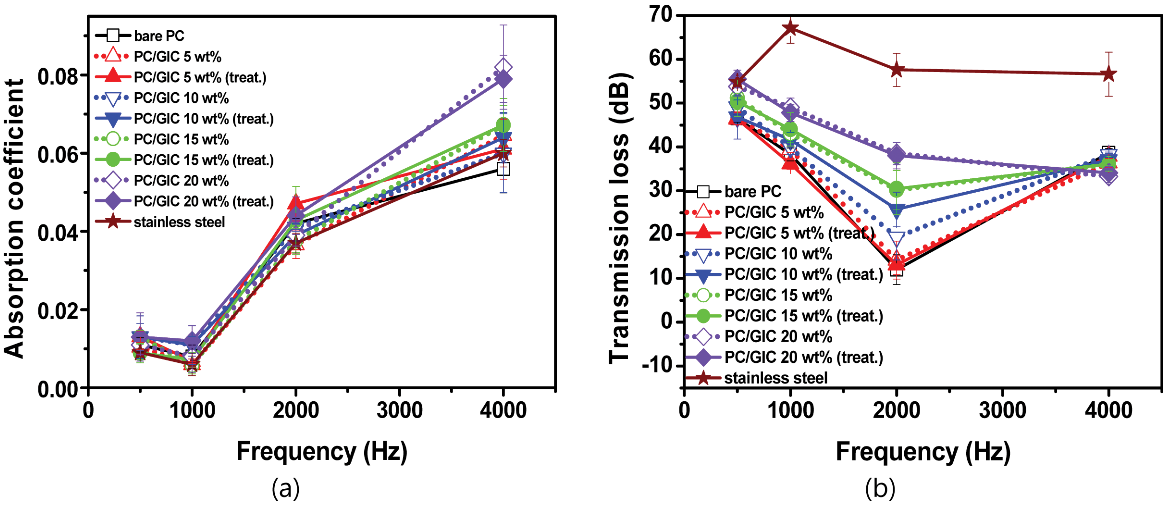

Figure 5. (a) Sound absorption coefficient; (b) sound transmission loss of PC and GIC/PC composites.

적으로 증가하였다. 이는 필러의 양이 증가함에 따라 계면적이 증가하고 판상구조를 가지는 GIC 필러에 의해 음파의 계면 산란과 굴절이 증가하여 복합재료의 투과손실이 커지는 것으로 볼 수 있다. PC/GIC(20 wt%) 복합재료의 음투과손실은 순수 PC에 비해 2000 Hz 주파수 영역에서는 26 dB 높은 값을 가졌으나, 4000 Hz 주파수 영역에서는 6 dB 정도 낮은 값을 나타내었다. 스테인레스강의 음투과손실은 500 Hz 에서 PC/GIC(20 wt%) 복합재료와 비슷하지만 1000 Hz 이상의 고주파에서는 PC 복합재료에 비해서 높은 차음특성을 보였다. 대부분의 주파수 영역에서 스테인레스강의 차음손실은 PC 복합재료에 비하여 약 9배 높은 면밀도를 가지는 스테인레스강의 특성 때문에 약 20 dB 증가한 것으로 추정된다. 이상의 결과로부터 흡음보다 차음이 중요한 용도에는 PC 복합재료보다 스테인레스강을 사용하는 것이 유리하지만, 경량성, 차음성, 흡음성이 모두 중요한 수송용 차량 용도에는 스트레인레스강보다 고함량의 GIC를 포함하는 PC 복합재료가 대안이 될 수 있음을 알 수 있다.

열중량 분석을 통하여 GIC 함량과 OA 표면처리가 복합재료의 열적 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. Figure 6은 순수 PC와 PC/GIC 복합재료의 열중량 분석 그래프이다. 필러가 포함되지 않은 순수 PC와 GIC를 10, 20 wt%를 포함하는 복합재료가 유사한 열중량 거동 그래프를 보여주고 있고, OA 표면처리에 의한 열중량 변화 차이 및 열안정성은 미미한 것을 알 수 있다. 시료들의 대략적인 중량변화 요인으로, 400 °C 이하의 온도에서는 수분, 미반응 올리고머 등의 미량 기화로 볼 수 있고, 500 °C 근처의 온도에서는 PC의 열분해에 의해 급격한 중량변화를 보이는 것을 알 수 있다. 550 °C 이상의 온도에서는 투입 GIC의 함량에 따라 잔여중량이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 순수 PC의 경우에 550 °C 이상의 온도에서 약 23 wt%의 탄화잔유물(char)을 가지는 것

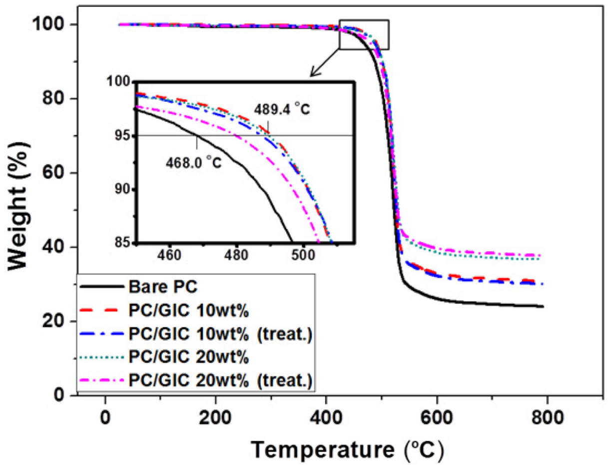

Figure 6. Thermal gravimetric analysis curves of bare PC and composites as a function of GIC filler loading.

은 Banerjee 등의 연구결과와 유사하다.[25]

Figure 6의 삽입 그림에서 보는 바와 같이 GIC 필러가 포함되는 대부분의 복합재료는 순수 PC와 비교하여 95 wt%의 중량을 유지하는 온도가 약 20 °C 상승하였다. 이와 같은 결과는 매트릭스 내에 균일하게 분산된 GIC 필러가 PC 복합재료의 열적 안정성을 높이기 때문으로 생각된다.

결　론

폴리카보네이트 매트릭스 내에 GIC를 혼합하여 PC/GIC 복합재료를 제조하여 GIC의 분산상태를 주사전자현미경으로 관찰하고, OA 표면처리가 복합재료의 구조, 흡음계수, 음투과손실, 열전도도, 열적 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다. 주사전자현미경으로 파단면을 관찰한 결과 OA로 표면처리

된 GIC를 포함하는 복합재료는 미처리 GIC를 포함하는 복합재료에 비하여 상대적으로 적은 수의 기공을 포함하였고, 양호한 분산과 강한 계면 특징을 보였다. GIC의 함량이 증가함에 따라 PC 복합재료의 흡음계수 및 음투과손실이 증가하였으나, GIC 필러의 OA 처리 유무는 PC/GIC 복합재료의 음향학적 특성에 거의 영향을 미치지 않았다. GIC 필러 추가에 의하여 급격한 열전도도 향상을 보였으며, OA 처리에 의한 GIC의 양호한 분산과 PC와 GIC의 강한 결합이 우수한 열전도도를 갖게 하는 주요 인자임을 확인하였다. 본 연구의 결과는 스테인레스강에 비하여 경량화가 가능한 PC/GIC 복합재료를 흡음성과 차음성을 향상시키는 수송교통용 내장재로 적용하는 것이 가능함을 보여주고 있다.

감사의 글: 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업(2016H1D5A1908330) 성과입니다.

참 고 문 헌

1. C. M. Wu and M. H. Chou, *Comp. Sci. Tech.*, **127**, 127 (2016).
2. I. H. Song, J. S. Kim, and Y. K. Hong, *Textile Coloration and Finishing*, **23**, 304 (2011).
3. M. E. Delany and E. N. Bazley, *Appl. Acoust.*, **3**, 105 (1970).
4. A. Zent and J. T. Long, *SAE Technical Paper* (No. 2007-01-2186).
5. J. W. Choi and Y. Hwang, *Korean J. Mat. Res.*, **20**, 467 (2010).
6. M. S. Kim, J. Yan, K. M. Kang, K. H. Joo, J. K. Pandey, Y. J. Kang, and S. H. Ahn, *J. Appl. Polym. Sci.*, **130**, 504 (2013).
7. D. Li and R. B. Kaner, *Science*, **320**, 1170 (2008).
8. K. M. F. Shahil and A. A. Balandin, *Nano Lett.*, **12**, 861 (2012).
9. A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. N. Lau, *Nano Lett.*, **8**, 902 (2008).
10. S. Stankovich, D. A. Dikin, Geoffrey H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, *Nature*, **442**, 282 (2006).
11. J. Liang, Y. Huang, L. Zhang, Y. Wang, Y. Ma, T. Guo, and Y. Chen, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 2297 (2009).
12. D. Cai and M. Song, *Nanotechnology*, **20**, 085712 (2009).
13. S. Chatterjee, F. Nüesch, and B. Chu, *Nanotechnology*, **22**, 275714 (2011).
14. R. Hollertz, S. Chatterjee, H. Gutmann, T. Geiger, F. A. Nuesch, and B. T. T. Chu, *Nanotechnology*, **22**, 125702 (2011).
15. Q. Chen, L. Dai, M. Gao, S. Huang, and A. Mau, *J. Phys. Chem. B*, **105**, 618 (2001).
16. J. A. Kim, D. G. Seong, T. J. Kang, and J. R. Youn, *Carbon*, **44**, 1898 (2006).
17. S. Chatterjee, J. W. Wang, W. S. Kuo, N. H. Tai, C. Salzmann, W. L. Li, and B. T. T. Chu , *Chem. Phys. Lett.*, **531**, 6 (2012).
18. S. R. Kim, M. Poostforush, J. H. Kim, and S. G. Lee, *Express Polym. Lett.*, **6**, 476 (2012).
19. G. D. Park, H. O. Jung, S. G. Lee, J. H. Lee, K. M. Kim, J. H. Yim, and S. R. Kim, *Macromol. Res.*, **14**, 254 (2015).
20. W. Zheng and S. C. Wong, *Comp. Sci. Tech.*, **63**, 225 (2003).
21. B. C. Lee, G. D. Park, S. G. Choi, and S. R. Kim, *Comp. Res.*, **28**, 389 (2015).
22. J. Zhu and E. V. Barrera, *Nano Lett.*, **3**, 1107 (2003).
23. Y. H. Bae, G. D. Park, H. O. Jung, M. C. Vu, and S. R. Kim, *Polym. Korea*, **40**, 148 (2016).
24. Y. Qin, L. Liu, J. Shi, W. Wu, J. Zhang, Z. X. Guo, Y. Li, and D. Zhu, *Chem. Mater.*, **15**, 3256 (2003).
25. B. S. Banerjee, S. S. Khairab, and B. K, *RSC Adv.*, **4**, 63380 (2014).