KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 30, No. 3 175~180 (2024)
https://doi.org/10.20909/kopast.2024.30.3.175

Microwave를 이용하여 합성한 탄소양자점을 활용한 PET의 자외선 차단 특성 향상 연구

김현진 · 박기태 · 장재영 · 앤서니 자밀러 라흐만 · 서종철*

연세대학교 패키징 및 물류학과

Applying Microwave-Assisted Carbon Quantum Dots for Enhancing the Properties of PET

Hyunjin Kim, Kitae Park, Jaeyoung Jang, Jamilur R. Ansari, and Jongchul Seo*

Department of Packaging & Logistics, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Kangwon-do, 26493, South Korea

Abstract Carbon Quantum Dots (CQDs) have garnered significant interest in recent years due to their unique properties, including high UV-blocking capabilities and low toxicity. This makes them a promising candidate for the use in packaging applications. For packaging applications, the incorporation of CQDs into non-aqueous polymers such as polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) are being explored. We have synthesized CQDs using citric acid in acetone, and then incorporated into PET using a spray coating method with various concentrations in the range of 0~0.7%. The PET/CQDs composite films were prepared using a hot-press process. The synthesized CQDs was analyzed using UV-visible spectroscopy, PL and TEM. The prepared PET/CQDs composite films was evaluated using FTIR, DSC, UV-Vis, OTR measurements to understand their chemical, thermal, and UV-blocking properties. It was observed that the UV-blocking properties of the PET film containing 0.7% CQDs were significantly enhanced, with a 50% reduction over pure PET. Furthermore, the PET/CQDs composite film with 0.1% CQDs showed the lowest OTR value of 20 g/m^2·day, comparing to pure PET of 41 g/m^2·day for. These results demonstrate how PET/CQDs composite films can be used in packaging, particularly in sectors where improved UV-blocking qualities are crucial.

Keywords CQDs, PET, UV-blocking, Citric Acid, Microwave, Composite films

서 론

최근 몇 년간 탄소 양자점 (Carbon Quantum Dots, CQDs)은 독특한 광학적, 전자적 특성으로 많은 주목을 받고 있다[1]. CQDs는 높은 자외선 차단 능력, 낮은 독성, 환경 친화성 등의 장점으로 다양한 응용 분야에서 유망한 소재로 떠오르고 있다[2]. 특히, 식품이 자외선에 직접 노출되는 것을 방지하는 자외선 차단 기능성 포장 재료로써 활용 가능성이 활발히 연구되고 있다. CQDs는 다양한 합성 경로를 통해 제조될 수 있으며, 상향식 (bottom-up) 및 하향식 (top-down) 방법이 널리 사용된다[3]. 상향식 방법 중에서도 열분해 및 열수 합성, 그리고 Microwave를 이용한 방법이 대표적이다. 특히, 본 연구에서 사용한 Microwave를 이용한 합성 방법은 신속하고 효율적이며, 비용이 저렴한 장점이 있다[4].

PET (Polyethylene Terephthalate)는 높은 강성, 우수한 기계적 강도, 내화학성을 지닌 폴리에스터 계열의 대표적인 반결정성 투명 열가소성 물질로, 음료 및 생수병, 합성섬유, 비디오 및 오디오 테이프, 사진 필름, 식품 포장재 등 다양한 분야에 사용된다[5]. 그러나, 자외선에 장기간 노출되면 PET의 외관과 광투과율 특성이 현저하게 감소하는 문제가 있다[6,7]. 따라서 자외선 차단을 위해 기존에는 탄산 칼슘, 유리 섬유, 점토 등과 같은 무기 나노 물질이 사용되었지만, 이들은 종종 독성 문제와 환경적 영향을 유발할 수 있다[8].

CQDs는 고분자의 기계적, 열적 특성을 유지하면서도 자외선 차단 능력을 극대화할 수 있는 가능성을 제공한다. 또한, CQDs는 낮은 농도에서도 효과적인 자외선 차단 성능을 발휘할 수 있어, 식품 포장재로서 UV에 민감한 식품을

*Corresponding Author: Jongchul Seo, Ph.D.
Department of Packaging & Logistics, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Kangwon-do, 26493, South Korea
Tel: Tel: +82-33-760-2697, Fax: +82-33-760-2954
E-mail: jcseo@yonsei.ac.kr

보호하는 데 가능성이 높을 것으로 기대된다[9,10]. 이와 같은 CQDs의 독특한 광학적 특성은 자외선을 흡수하고 이를 열로 변환하는 능력에 기인한다.

기존 연구에서는 수용액 기반의 CQDs가 제조됨에 따라 간단한 용매 캐스팅 방법을 이용하는 폴리비닐 알코올 (PVA) 등의 소재에서 자외선 차단 기능 부여를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 수용액 기반의 CQDs는 주로 압출공정에 의해 제품화하는 폴리프로필렌, 폴리에틸렌, PET 등의 고분자에 적용하는 것이 어려움이 있었다.

본 연구에서는 수용액 기반이 아닌 에틸렌글리콜과 아세톤을 이용하며 높은 수율의 CQDs를 제공하는 구연산과 에틸렌디아민을 Microwave 처리를 하여 CQDs를 합성하고 이를 PET에 함침시켜 자외선 차단 특성을 부여하고자 하였다[11,12,13]. 이를 위하여 제조된 CQDs를 아세톤에 분산시켜 스프레이 코팅 방식으로 PET에 복합하여 CQDs 함유 PET (PET/CQDs) 복합필름을 제작하였다. 제조된 PET/CQDs 복합필름의 자외선 차단 성능과 열적 특성을 조사하였다. 이를 통하여 CQDs의 PET 응용 가능성 확인을 통하여 친환경적이고 지속 가능한 포장 재료 개발에 기여하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

PET (polyethylene Terephthalate) 파우더는 새한프라텍 (Saehan Platech. Co., Ltd., South Korea)에서 제공되었다. 아세톤 (Acetone)과 에탄올 (Ethanol)은 대정화금 (Daejung Chemicals Co., Ltd., South Korea), 에틸렌글리콜 (Ethylene Glycol)과 구연산 (Citric acid), 에틸렌디아민 (Ethylene diamine)은 머크 그룹(Merck KGaA, Co., Ltd., Germany)에서 각각 구매하였다. 폴리이미드 필름은 (Tape World Co., Ltd., South Korea)에서 구매하였다. 모든 화학 약품은 추가적인 정제없이 사용하였다.

2. Microwave를 활용한CQDs 제조

CQDs 합성은 먼저 구연산 5.76 g과 에틸렌디아민 1.33 ml을 에틸렌글리콜 20g과 아세톤 30ml에 첨가한 후, 5 hr 동안 자기교반기를 이용하여 교반하였다. 이후 Microwave (MAS-II Plus Microwave Synesis Workstation, Sineo Co., Ltd., China)를 사용하여 700W에서 7 min 동안 진행하였다. Microwave처리가 끝난 후 남은 혼합물을 아세톤과 에탄올 (8/2) 혼합용액으로 세척을 하였다. 이후 분쇄 과정을 통해 CQDs 파우더를 얻게 되었다. 얻은 파우더를 아세톤에 초음파처리 (POWERSONIC 610, Hwashin Co., Ltd., South Korea)하여 1 hr 분산시킨 후, 원심분리기 (D2012 plus, DLAB SCIENTIFIC Co., Ltd., China)를 이용하여 14,000 rpm에서 20 min 진행한 후 CQDs를 포함하는 상층액을 채취하였으며, 이를 복합필름 제작에 이용하였다.

3. PET/CQDs 복합필름 제작

본 연구의 PET/CQDs복합필름을 제작하기 위하여 제조된 CQDs 적정량을 아세톤에 분산시킨 뒤 스프레이를 사용하여 PET 파우더에 CQDs가 잘 분산되도록 전체면에 코팅하였다. 이후 150°C의 오븐(OF-12 GW, Jeio Tech Co., Ltd., South Korea)에서 4 hr 건조한 뒤 PET 파우더를 두 개의 폴리이미드 필름 사이에서 260°C 온도로 Heat Press (QM900A, Qmesys Co., Ltd., South Korea)을 이용하여 2 min 간 열압착하여 PET/CQDs 복합필름을 제작하였다. 본 연구에서 제조한 PET/CQDs 복합필름의 샘플명과 조성은 Table 1에 나타내었다.

4. 실험방법

본 실험에서 합성한 CQDs의 크기 및 분포를 측정하기 위해 투과전자현미경 (TEM, JEM-ARM200F, NEOARM, JEOL Ltd., Japan)을 사용하였다. HR-TEM은 아세톤에 분산되어 구리 그리드(Copper grid)에 증착 후 측정되었다. CQDs의 광발광 특성은 형광분광기 (Spectro Fluorophotomer, Shimadzu–RF6000 Co., Ltd., Japan)를 사용하였다. 아세톤에 용해된 CQDs를 유리 셀에 담아 200 - 600 nm범위의 Photoluminescence (PL) 스펙트럼을 측정하였다. CQDs의 자외선 차단 효과는 아세톤에 용해된 CQDs를 석영 셀에 담아 UV-Vis 분광 광도계 (JASCO V-650, JASCO International Co., Ltd., Japan)를 사용하여 측정하였다. 측정은 200~800 nm 범위에서 진행하였다.

PET/CQDs복합필름의 화학적 특성은 푸리에변환적외선은 ATR-FTIR (Attenuated total reflectance fourier transform infrared, PerkinElmer, Co., Ltd., USA)을 사용하여 4000 ~400 cm^{-1} 범위에서 32 scan로 측정하였다.

PET/CQDs 복합필름의 열적 특성은 시차주사 열량계 (DSC, TA Instrument Q10, Co., Ltd., USA)를 이용하여 측정하였다. 측정 온도 범위는 0에서 300°C, 승온 속도 10°C/min로 질소분위기 하에서 진행하였다. PET/CQDs 복

Table 1. Compositions and thermal properties of PET/CQDs composite films

Sample	Composition		DSC	
	CQDs Solution (ml)	PET (g)	T_g (°C)	T_m (°C)
PET	0	3	75.3	231.9
CQDs 0.1%	10	3	75.1	232.6
CQDs 0.3%	30	3	75.3	232.4
CQDs 0.5%	50	3	75.5	232.8
CQDs 0.7%	70	3	74.5	232.4

합필름의 산소차단성은 OTR 8001 산소 투과도 시험기 (OTR, Oxygen permeation analyzer 8001, Systech Illinois Ltd., USA)를 사용하여 23°C, 0% 상대습도에서 수행되었다. 또한 PET/CQDs 복합필름의 자외선 차단 특성은 상기의 UV-Vis 분광 광도계를 사용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

1. CQDs의 형태학적 연구

Microwave 처리를 이용해 합성한 CQDs의 형상을 분석하기 위하여 TEM 분석을 실시하였다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이TEM 이미지는 잘 분산된 CQDs의 형태와 구조를 관찰할 수 있었으며, Fig. 1(b)에서 CQDs 입자는 10 nm 이하임을 알 수 있었다. ImageJ 소프트웨어(NIH)를 사용하여 HR-TEM 이미지로부터 계산된 크기 분포를 Fig. 1(c)에 나타내었다. CQDs의 입자는 2~6 nm 직경의 구형의 형상을 나타내는 것을 확인하였다. 이는 10 nm 이하의 CQDs가 성공적으로 합성되었음을 의미한다.

2. 흡수 스펙트럼

CQDs의 자외선 차단 특성을 확인하기 위해 UV-Vis분석을 진행하였다. CQDs의 광흡수 스펙트럼을 측정한 Fig. 2을 살펴보면 UV범위(300~400 nm) 영역에서 높은 흡광도를 나타내었으며, 254 nm의 UV 조사에 노출된 CQDs 용액은 육안으로 밝은 파란색의 방출을 확인할 수 있었다. 이는 CQDs가 탄소 sp^2 오비탈의 π-π^* 전자 전이에 기인하여 이를 통해, 자외선을 가시광선으로 효과적으로 변환할 수 있기 때문이다[14]. 이러한 결과는 microwave처리로 합성한 CQDs 입자가 우수한 UV 흡수 성능을 가지며, PET/CQDs 복합필름에서 UV 차단성능을 나타낼 것으로 기대된다.

합성된 CQDs형광(Photoluminescence, PL) 특성은 특정 파장에서 에너지를 흡수하여 빛으로 방출하는 CQDs의 대표적인 특징 중 하나이다[15]. CQDs는 자외선 파장의 빛을 흡수하고, 가시광선 파장으로 방출하는 특징을 가지고 있다. 이러한 광 특성은 CQDs의 크기와 형태, Edge effect, Surface effect에 의해서 달라질 수 있다[16]. Fig. 3은 합성된 탄소양자점의 여기파장 의존 형광스펙트럼을 나타낸다. 범위는 370~410 nm 여기 광을 측정하였고 파장 395 nm에서 여기할 때 459 nm 파장에서 최대 방출이 일어났다. Band gap은 식 (1)을 사용하여 PL 방출 파장(λ)으로부터 계산되었다. 여기서 E_g는 밴드 갭 에너지, h는 플랑크 상수, c는 광속을 각각 나타낸다. 계산된 Band gap은 370~410 nm 여기 광에 따라 2.67에서 2.73 eV (464에서 455 nm)으로 나타났다. 이러한 Band gap에 대한 차이는 CQDs의 크기 분포와 표면 특성으로 인해 발생할 수 있다[17]. Fig. 3은 아세톤에 분산시킨 탄소 양자점을 자연광과 자외선광에 두었을 때의 이미지를 나타낸다. 자연광 상태에서는 밝은 갈색을 띄고 있고, 자외선 광에서는 청색을 띄는 것을 확인할

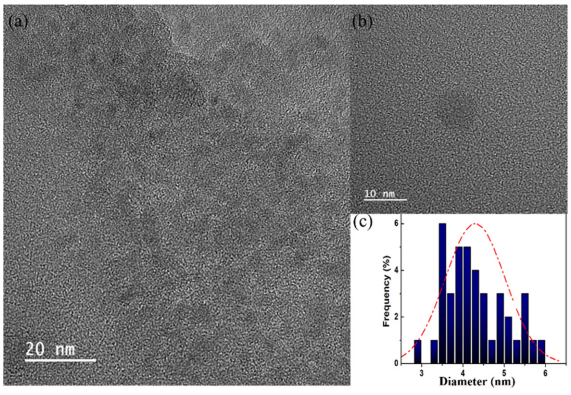

Fig. 1. TEM images of the CQDs synthesized by microwave treatment.

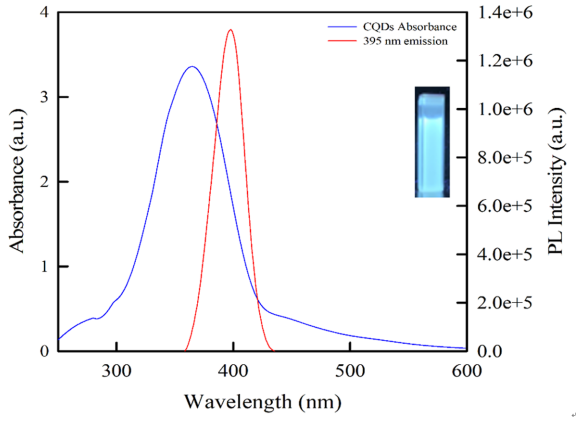

Fig. 2. Optical characterizations of CQDs synthesized in this study.

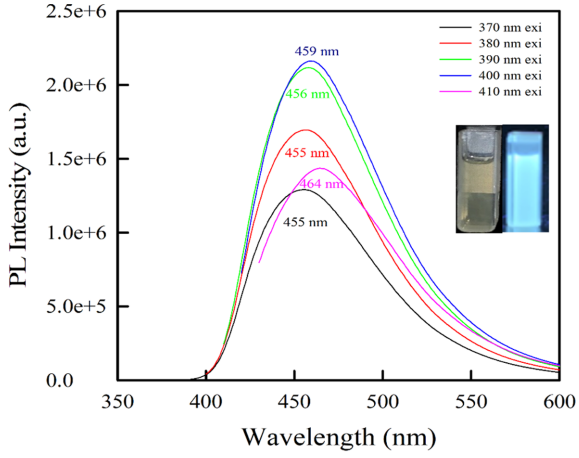

Fig. 3. PL spectra of CQDs

수 있다. 이는 CQDs가 자외선 영역에서 높은 에너지를 흡수하여, 청색 빛으로 방출하는 현상으로 CQDs가 성공적으로 합성되었음을 의미한다.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda}ev = \frac{1240}{\lambda}ev \quad (1)$$

3. PET/CQDs 복합필름 화학적 구조 분석

PET/CQDs 복합필름의 화학적 상호작용을 확인하고자 각 필름의 FT-IR 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. PET의 특성 피크는 2956와 2867 cm^{-1} (C–H stretching of the CH_2 groups), 1712 cm^{-1} (C=O stretching of carboxylic ester group), 1576, 1509와 1409 cm^{-1} (aromatic skeleton stretching), 1453와 873 cm^{-1} (CH_2 bending and CH_2 rocking), 1238와 1089 cm^{-1} (C–C–O stretching of ester group), 1015와 725 cm^{-1} (in-plane C–H stretching and out-of-plane C–H bending of aromatic ring) 으로 나타난다. 반면, CQDs를 함유한 PET/CQDs 복합필름은 CQDs의 피크 및 PET 피크의 변화가 확인되지 않았다. 이는 첨가된 CQDs의 낮은 함량 때문에 발생할 수 있으며, CQDs가 PET의 화학적 구조를 변화시키지 않았음에 기인한다[18,19,20].

4. PET/CQDs 복합필름의 열적특성 분석

열적 특성은 PET의 가공 및 제품 사용 온도를 결정하는 중요한 특성이다. PET/CQDs 복합 필름의 열적 특성을 평가하기 위해 DSC 분석을 실시하였으며, Fig. 5와 Table 1에 나타내었다. PET 필름은 유리전이온도(T_g)은 75.3°C, 녹는점(T_m)은 231.9°C로 나타내었다. PET/CQDs 복합 필름은 PET 필름과 유사한 값을 나타내었다. 이는 도입된 CQDs가 PET의 열적 특성에 큰 영향을 미치지 않으며,

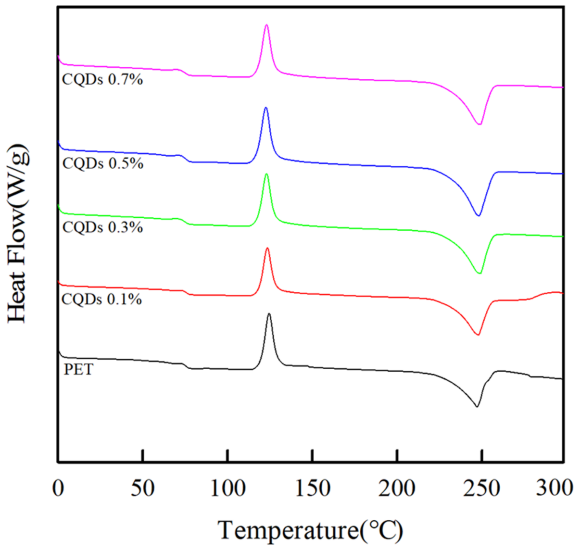

Fig. 5. DSC curves of the PET/CQDs composite films.

PET/CQDs 복합 필름이 기존 PET의 가공 및 제품 사용 온도를 유지할 수 있음을 의미한다.

5. PET/CQDs 복합필름의 자외선 투과도 분석

포장용 필름의 빛에 대한 투과성과 차단성은 제품의 종류와 고객의 요구에 따라 매우 중요한 특성 중 하나이다[21]. 일반적으로 소비자 측면에서 가시광선 영역은 투명성을 위해 높은 투과율이 요구되며, 자외선에 민감한 식품품질 보장을 위해서는 자외선 영역은 낮은 투과율이 필요하다. 가시광선과 자외선 영역에서의 투과특성을 확인하기 위하여 200~800 nm 영역에서 UV-Vis를 측정하였으며, Fig. 6에 나타내었다. PET 필름은 UV영역 (300~400 nm)과 가시광

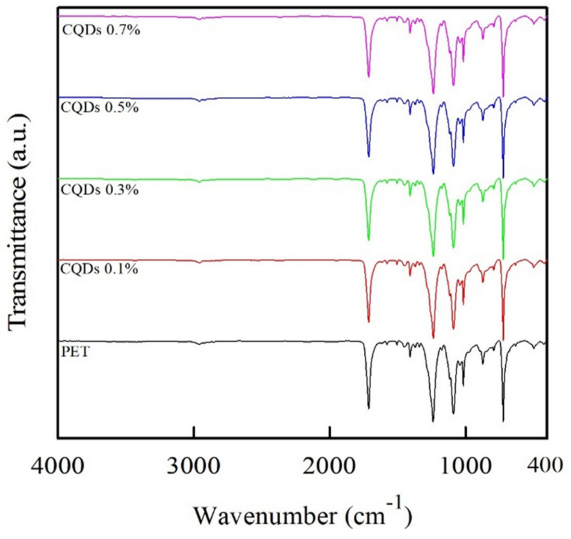

Fig. 4. ATR-FT-IR spectra of PET/CQDs composite films.

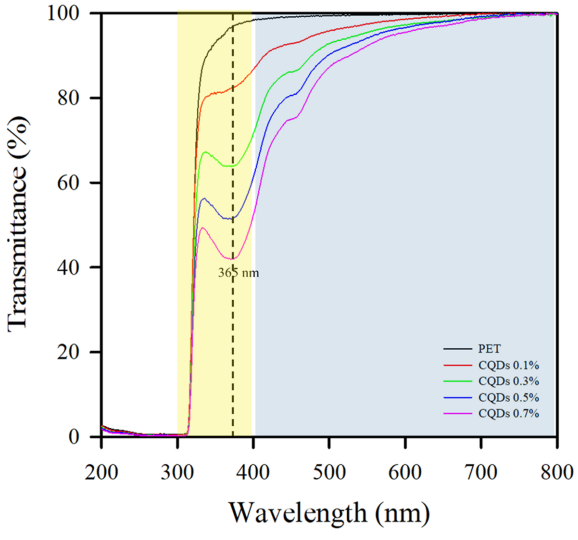

Fig. 6. UV- spectra of PET/CQDs composite films.

Fig. 7. Appearance of PET/CQDs composite films. (a) PET, (b) CQDs 0.1%, (c) CQDs 0.3%, (d) CQDs 0.5%, (e) CQDs 0.7%

선(800~400 nm) 영역에서 95% 이상의 높은 투과율을 보였다. 이는 순수 PET 필름의 경우 자외선 차단 특성이 없으며, 가시광선 영역에서 PET 필름이 투명함을 나타낸다. 가시광선 영역에서 CQDs가 0.1~0.3% 첨가된 PET/CQDs 복합 필름은 빛 투과율이 80% 이상으로 높은 투명성을 나타내었으나, CQDs가 0.7% 이상 첨가되었을 시 투과율이 60%로 저하되어 필름의 투명성이 감소하였다. CQDs의 밝은 갈색 색상을 고려하면, PET/CQDs복합필름은 시각적으로 색상 변화를 일으켰다. CQDs가 첨가된 필름의 투명성은 Fig. 7과 같이 CQDs의 농도가 높아질수록 필름의 색상이 짙어졌다. 반면, UV A(400~320 nm) 영역의 경우 PET/CQDs 복합 필름은 365 nm범위에서 빛 차단 특성을 나타내었으며 CQDs 농도가 증가함에 따라 최대 42%의 자외선 투과율을 나타내었다. PET/CQDs 복합 필름의 자외선 차단 영역은 Fig. 2에서 나타난 CQDs 자외선 흡광 영역과 일치하였으며, 이는 PET/CQDs 복합 필름의 자외선 차단 특성이 CQDs에서 기인하였음을 알 수 있다.

6. PET/CQDs 복합필름의 산소투과도 분석

높은 산소 차단 특성은 식품 저장성을 향상시킬 수 있다[22]. 이에 PET/CQDs 복합 필름의 OTR 분석을 실시하여 Fig. 8에 나타내었다. PET에 CQDs 0.1%가 첨가됨에 따라 OTR 값이 41.6 cc/m^2·day에서 21.7 cc/m^2·day으로 감소되었다. 반면, CQDs가 0.3~0.7% 첨가됨에 따라 OTR 값은 35.8 ~39.6 cc/m^2·day으로 OTR 값이 다시 증가되었다. 고분자 내 잘 분산된 CQDs는 고분자 매트릭스 내 산소 분자의 이동 경로에 장애물로 작용할 수 있어, 고분자의 산소 차단 특성을 증가시킬 수 있다. 반면, 높은 농도의 CQDs는 고분자 매트릭스 내 응집됨에 따라 산소 차단 증가 효과를 가져오지 못하였다[23]. 따라서, 보다 높은 산소 차단성을 가지는 PET를 개발하기 위해서는 고분자 필름 내 CQDs의 응집을 최소화하고 분산성을 확보하는 추가적인 연구가 필요하다.

요 약

본 연구에서는 Microwave를 이용하여 자외선 차단 특성을 지닌 CQDs를 합성하였으며, PET/CQDs 복합필름을 제작하였다. CQDs의 합성을 TEM과 PL로 확인하고, FT-IR, DSC, UV-Vis, OTR을 통해 복합필름의 화학적 구조, 열적 특성, 가스 투과성을 분석하였다. PET/CQDs 복합필름은 365 nm에서의 자외선 흡수로 인해 자외선 차단 효과가 뛰어났으며, 고분자와의 화학적 상호작용이 없어 CQDs 함량이 증가해도 열 안정성이 유지되었다. 자외선 차단 성능은 CQDs 함량에 비례하여 향상되었다. 이는 자외선 차단제를 사용하지 않고도 PET 내부에서 자외선을 효과적으로 차단할 수 있음을 의미한다. 한편, CQDs의 농도가 증가함에 따라 응집이 발생하여 기체차단성이 향상되지 않은 문제점이 있으며, 분산성을 개선하기 위한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2023년 정부(과학기술통신부) 한국연구재단(RS202300263418), 2022년 정부(농림축산식품부)의 재원으로 농림식품기술기획평가원(RS-2022 IP322015)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Tuerhong, M., Yang, X. and Xue-Bo, Y. 2017. Review on carbon dots and their applications. Chin. J. Anal. Chem, 45(1), 139-150.
2. Jeong, H. and Jeon, S. 2008. Determination of dopamine in the presence of ascorbic acid by nafion and single-walled carbon nanotube film modified on carbon fiber microelectrode. Sensors, 8(11), 6924-6935.
3. Das, R., Bandyopadhyay, R. and Pramanik, P. 2018. Carbon quantum dots from natural resource: A review. Mater. Today Chem, 8, 96-109.
4. Ozcan, A., İlkbaş, S. and Özcan, A. A. 2017. Development of a disposable and low-cost electrochemical sensor for dopamine detection based on poly (pyrrole-3-carboxylic acid)-modified electrochemically over-oxidized pencil graphite electrode. Talanta, 165, 489-495.
5. Nisticò, R. 2020. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. Polym. Test, 90, 106707.
6. Shanky Bhat, S. B. 2013. Minimal processing and preservation of fruits and vegetables by active packaging. Int. J. Herb. Med, 1, 131-138

7. Kumar, S., Boro, J. C., Ray, D., Mukherjee, A. and Dutta, J. 2019. Bionanocomposite films of agar incorporated with ZnO nanoparticles as an active packaging material for shelf life extension of green grape. Heliyon, 5(6).
8. Bahadar, H., Maqbool, F., Niaz, K. and Abdollahi, M. 2016. Toxicity of nanoparticles and an overview of current experimental models. Iran. Biomed. J, 20(1), 1-11
9. Hess, S. C., Permatasari, F. A., Fukazawa, H., Schneider, E. M., Balgis, R., Ogi, T., Okuyama, K. and Stark, W. J. 2017. Direct synthesis of carbon quantum dots in aqueous polymer solution: one-pot reaction and preparation of transparent UV-blocking films. J. Mater. Chem, 5(10), 5187-5194.
10. Jeong, H. and Jeon, S. 2008. Determination of dopamine in the presence of ascorbic acid by nafion and single-walled carbon nanotube film modified on carbon fiber microelectrode. Sensors, 8(11), 6924-6935.
11. Zhang, Y., Zhuang, S., Xu, X. and Hu, J. 2013. Transparent and UV-shielding ZnO@ PMMA nanocomposite films. Adv. Opt. Mater, 36(2), 169-172.
12. Li, L., Mak, K., Leung, C. W., Chan, K., Chan, W., Zhong, W. and Pong, P. 2013. Effect of synthesis conditions on the properties of citric-acid coated iron oxide nanoparticles. Microelectron. Eng, 110, 329-334.
13. Lim, H., Liu, Y., Kim, H. Y. and Son, D. I. 2018. Facile synthesis and characterization of carbon quantum dots and photovoltaic applications. Thin Solid Films, 660, 672-677.
14. Mai, X.-D., Chi, T. T. K., Nguyen, T.-C. and Ta, V.-T. 2020. Scalable synthesis of highly photoluminescence carbon quantum dots. Mater. Lett, 268, 127595.
15. Ke, J., Li, X., Zhao, Q., Liu, B., Liu, S. and Wang, S. 2017. Upconversion carbon quantum dots as visible light responsive component for efficient enhancement of photocatalytic performance. J. Colloid Sci, 496, 425-433.
16. Molaei, M. J. 2020. Principles, mechanisms, and application of carbon quantum dots in sensors: a review. Food Anal. Methods, 12(10), 1266-1287.
17. Wang, Y. and Hu, A. 2014. Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. J. Mater. Chem, 2(34), 6921-6939.
18. Roy, S. and Rhim, J.-W. 2019. Carrageenan-based antimicrobial bionanocomposite films incorporated with ZnO nanoparticles stabilized by melanin. Food Hydrocoll, 90, 500-507.
19. Roy, S. and Rhim, J.-W. 2019. Preparation of carrageenan-based functional nanocomposite films incorporated with melanin nanoparticles. Colloids Surf. B: Biointerfaces, 176, 317-324.
20. Roy, S., Shankar, S. and Rhim, J.-W. 2019. Melanin-mediated synthesis of silver nanoparticle and its use for the preparation of carrageenan-based antibacterial films. Food Hydrocoll, 88, 237-246.
21. Ezati, P. and Rhim, J.-W. 2021. Starch and agar-based color-indicator films integrated with shikonin for smart packaging application of shrimp. ACS Food Sci. Technol, 1(10), 1963-1969.
22. Al-Jabareen, A., Al?Bustami, H., Harel, H. and Marom, G. 2013. Improving the oxygen barrier properties of polyethylene terephthalate by graphite nanoplatelets. J. Appl. Polym. Sci, 128(3), 1534-1539.
23. Latif, Z., Shahid, K., Anwer, H., Shahid, R., Ali, M., Lee, K. H. and Alshareef, M. 2024. Carbon quantum dots (CQDs) modified polymers: a mini review of non-optical applications. Nanoscale, 16, 2265-2288.

투고: 2024.06.25 / 심사완료: 2024.07.03 / 게재확정: 2024.07.04