

2021. 6. 8.(화) / 즉시 보도

문의 : 담당자 연락처(02-880-4927)

연구책임자 농생명공학부 강동현 교수(02-880-2697) / 교신저자
연구진 강준원 박사 (02-880-4927) / 제1저자

광촉매 살균에 활용되는 탄소양자점 합성의 효과적인 도핑 형태 규명

- 탄소양자점 합성 재료로써 식품 부산물 선정 기준 확립 -

- 비정질 (amorphous) 형태의 탄소 입자로 이루어진 나노 물질인 탄소양자점(Carbon quantum dot, CQD)은 그래핀, 풀러렌, 나노튜브 등과는 구별되는 새로운 형태의 탄소형 나노 물질로, 높은 안전/안정성, 친환경적 특성, 생체친화성, 높은 용해성, 쉬운 합성 등의 특징을 가져 기존의 양자점을 대체하여 광촉매, 전기 촉매, 검출, 바이오 이미징, 약물 전달 등 다양한 분야에서 효과적으로 적용될 수 있는 물질로 각광받고 있다.
- 다양한 활용 분야 중, 탄소양자점을 가시광선에 반응하여 병원성 미생물을 살균할 수 있는 광촉매로 활용한다면 태양광, 실내등과 같은 지속 가능한 에너지를 활용하여 미생물을 살균할 수 있다는 점에서 미래에 매우 유용한 살균물질로 활용될 수 있다.
- 탄소양자점은 탄소를 가지는 모든 유기물질로 합성될 수 있다는 특징 덕분에 가공 후 버려지는 식품 부산물을 탄소양자점으로 합성 재료로 활용할 수 있어, 식품 부산물을 활용하여 탄소양자점을 합성하면 경제적인 측면에서 장점을 가질 수 있을 뿐 아니라 부산물에 의한 환경 문제의 해결에도 도움이 될 수 있다.
- 한편, 탄소양자점이 합성될 때 탄소 외에 다른 원자가 섞이는 도핑(Doping)에 의해 그 특성이 변화한다고 알려져 있다. 그리고 식품 부산물

에는 탄소 외에도 아미노산 내에 질소(Nitrogen)와 황(sulfur)이 존재한다. 연구진은 식품 부산물 내의 아미노산 종류에 따라서 도핑의 형태가 다양해지기 때문에 식품 부산물 종류에 따라서 합성되는 탄소양자점의 특성이 변화한다는 점에 주목하였다. 현재까지 식품 부산물을 이용하여 다양한 탄소양자점을 합성하는 연구는 많이 시도되어 왔지만, 합성 재료인 식품 부산물을 선정하는데 특별한 기준은 존재하지 않았다. 따라서, 아미노산 내의 질소와 황이 도핑되는 형태에 따른 탄소양자점의 특성을 살펴봄으로써 최적의 식품 부산물을 선정하는데 있어 중요한 기준을 확립할 수 있다.

- 본 연구에서는 아미노산의 질소와 황의 도핑이 탄소양자점의 가시광선 감응 병원성 미생물 제어 효과를 증진시키는 것을 확인할 수 있었으며, 이때 황의 비율이 감소할수록 그 효과가 더 커지는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 탄소양자점을 합성하기 위한 식품 부산물을 선정할 때에 아미노산의 함량이 많아 도핑 효과적으로 이뤄지지만 황을 포함하는 아미노산의 비율이 적은 식품 부산물을 선정해야 된다는 실험적 근거를 제시하였다는 점에서 의의가 있다.
- 또한, 밴드갭 에너지, 광촉매 메커니즘, 양자수득률, 비표면적, 형광 수명이 탄소양자점의 광촉매 살균 활성과 관련 있는 인자라는 것을 규명하였다.
- 이 연구는 한국연구재단의 박사후국내연수 및 중견핵심 사업에서 지원을 받아 수행되었으며 연구결과는 화학공학 분야 상위 2.4% 국제학술지인 케미컬엔지니어링저널(Cheical Engineering Journal, IF: 10.652)에 게재되었다.

[붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명

연구 결과

Effect of amino acid-derived nitrogen and/or sulfur doping on the visible-light-driven antimicrobial activity of carbon quantum dots: A comparative study

Jun-Won Kang and Dong-Hyun Kang

(Chemical Engineering Journal, 2021; 420, 129990)

본 연구에서는 탄소 재료로 사과산 (Malic acid)를 이용하였으며 질소와 황 도핑을 위해 질소만 가지는 아미노산인 알라닌(Alanine)과 질소와 황을 모두 가지는 아미노산인 시스테인(Cysteine)을 이용하여 마이크로웨이브 처리를 통해 탄소양자점을 합성하였다. 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM), X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS), 푸리에 변환 적외선 분광법 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR), 광산란 측각기 (Dynamic Light Scattering, DLS) 분석을 통해 구조분석을 하였으며 효과적으로 도핑된 형태의 탄소양자점이 합성되었음을 확인할 수 있었다. 이후 400nm 이상의 가시광선 파장을 방출하는 제논램프 처리에 따른 탄소양자점의 병원성 미생물에 대한 저감화 효과를 살펴보았으며, 도핑이 되지 않은 탄소양자점은 살균 효과를 나타내지 않는 반면 질소와 황이 도핑이 되었을 때 가시광선에 반응하여 살균 효과를 나타내는 것을 관찰할 수 있었으며, 이때 황의 비율이 감소할수록 효과는 증가하는 것을 확인하였다. 이 결과를 통해 아미노산이 존재하여 도핑이 효과적으로 이루어질 수 있지만 황을 포함하는 아미노산의 비율은 적은 식품 부산물이 탄소양자점 합성재료로 적합하다는 결과를 도출할 수 있었다.

질소만 도핑이 된 탄소양자점은 질소와 황이 동시에 도핑이된 탄소양자점보다 더 큰 양자수득률 (Quantum yield), 비표면적 (Specific surface area), 형광 수명을 가지는 것으로 나타났으며, 또한 질소 도핑 탄소양자점

은 물과 산소를 모두 환원 및 산화시킬 수 있는 반면 질소와 황이 모두 도핑된 탄소양자점은 산소만 산화시킬 수 있는 서로 다른 광촉매 메커니즘을 가지는 것을 규명하였다. 높은 양자수득률은 흡수한 빛 에너지에 대해서 더 많은 활성 상태로의 전환이 될 수 있음을 의미하고 비표면적이 클수록 반응하는 면적이 넓어 반응 효율이 증가되며 형광 수명이 길수록 반응하지 않고 비활성 상태로 돌아가는 비율이 감소한다는 것을 의미한다. 따라서 양자수득률, 비표면적, 형광 수명 및 광촉매 메커니즘의 변화가 황의 비율이 감소할수록 광촉매 활성이 증가하는 원인이 될 수 있음을 제시할 수 있다. 이러한 특성들은 광촉매 살균을 위한 탄소양자점 합성에 있어 활성 정도를 예측하는데 중요한 지표로 활용될 수 있다.

용 어 설 명

1. 탄소양자점 (Carbon quantum dot)

- 탄소양자점은 10 nm 이하의 크기의 탄소로 이루어진 반도체 성질을 나타내는 나노 입자로 탄소의 sp^2 혼성화로 이루어진 핵과 탄소의 sp^3 혼성화 및 다양한 작용기로 이루어진 껍질로 이루어져 있음.

2. 도핑 (Doping)

- 반도체 생산 과정에서 도핑은 전기, 광학, 구조적 특성의 조절하기 위해 결정 제조과정중에 불순물을 의도적으로 첨가하는 것을 의미.

3. 아미노산 (Amino acid)

- 단백질의 기본 구성단위로 아미노기와 카르복실기로 이루어진 분자. 결사슬의 종류에 따라 아미노산의 형태가 결정되며 황을 추가적으로 가지는 아미노산 또한 존재.

4. 밴드갭 에너지 (Band gap energy)

- 반도체와 절연체에서 전자가 속박 상태 (Bound state)에서 자유롭게 벗어나기 위해 필요한 최소한의 에너지 양.

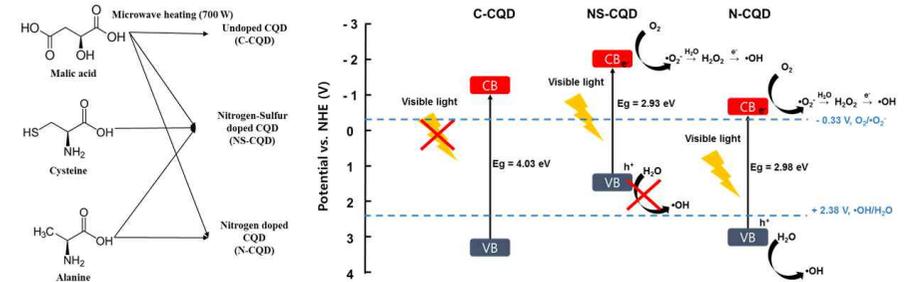
5. 양자수득률 (Quantum yield)

- 빛을 흡수하여 일어나는 발광 또는 광전자 방출 등의 경우에서, 흡수한 광자수에 대한 방출된 광자의 비율.

6. 비표면적 (Specific surface area)

- 단위 질량 또는 부피에 대한 표면적.

그 림 설 명



도핑이 되지 않은 탄소양자점(C-CQD)은 밴드갭 에너지가 가시광선보다 커서 가시광선 하에 활성을 나타내지 않는다. 한편, 도핑된 탄소양자점은 밴드갭 에너지가 감소하여 가시광선에 활성이 될 수 있는 상태로 변화했다. 또한, 질소 도핑 탄소양자점(N-CQD)은 질소-황 도핑 탄소양자점(NS-CQD)보다 유리한 광촉매 메커니즘과 더 큰 양자수득률, 형광 수명, 비표면적을 가져 광촉매 활성이 더 뛰어났다.