

# 기능성 고분자가 결합된 양자점 기술 및 응용

## Quantum Dot Technology and Applications Combined with Functional Polymers

양현승<sup>1</sup> · 박찬호<sup>2</sup> | Hyunseung Yang · Chan Ho Park

<sup>1</sup>Electronic Convergence Materials & Devices Research Center, Korea Electronics Technology Institute, #25 Saenari-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 13509, Korea

<sup>2</sup>Department of Chemical, Biological and Battery Engineering, Gachon University, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 13120, Korea  
E-mail: hsyang@keti.re.kr  
E-mail: chohpark@gachon.ac.kr

### 1. 서론

양자점(quantum dot, QD)은 수 nm 크기의 나노결정 발광체로, 조성 및 크기 제어를 통해 발광 파장을 설계할 수 있어 디스플레이, 광학 센서, 바이오 이미징 등에서 핵심 광원으로 활용되어 왔다. 현재는 CdSe, InP, 페로브스카이트 QD뿐 아니라 탄소계 양자점(carbon dot, graphene QD 등)까지 플랫폼이 확장되며 응용 목적에 따라 소재 선택과 복합화 전략이 함께 발전하고 있다.<sup>1,2</sup>

QD는 높은 발광 효율과 선택적 방출 스펙트럼이 가장 큰 광학적 차별성이다. Pb계 페로브스카이트 QD는 발광 효율이 최대 ~95%, 방출 스펙트럼은 반치전폭(full width at half maximum, FWHM) < 20-30 nm 수준으로 보고되어 고색재현 디스플레이 광원으로서 활용성이 크다.<sup>3</sup> 뿐만 아니라 흡수 및 방출 파장을 장파장(특히 근적외선, near-infrared(NIR)) 영역까지 설계할 수 있다. InP 및 Cu기반 QD는 바이오 투과창 기반 이미징/센싱, 적외선 광원·검출, NIR 흡수 기반 광열 응용 등에서 주목된다.<sup>4-6</sup> 다만 장파장 영역으로 갈수록 표면 결합 및 리간드 불안정, 응집에 따른 비방사 소광이 성능을 좌우하기 쉬워, QD를 고분자 리간드/매트릭스에 결합시켜 (i) 표면 패시베이션, (ii) 응집·용출 억제, (iii) 필름화·프린팅 등 공정성을 동시에 확보하는 전략이 필수다. 나아가 고분자 매트릭스를 활용한 (iv) 계면 에너지 전달·전하/광학 기능 조절, (v) 생체 독성 제어까지 포함하는 기능 집적 관점으로 확장이 필요하다. 하지만, QD는 콜로이드 상태에서 우수한 광특성을 보이더라도, 이를 필름, 비드, 겔, 코팅층 등의 형태로 변환하는 과정에서 분산성, 계면 접착, 기계적 안정성, 광학 손실(산란/흡수) 등을 동시에 만족시키기 어렵다.<sup>1,7</sup>

이러한 한계를 극복하기 위해 기능성 고분자를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최신 연구에서는 기능성 고분자를 활용하여 QD 표면 리간드로 결합하여 표면 결함을 제어하고, QD-고분자 계면을 설계함으로써 응집을 억제한다. 또한 매트릭스(필름/비드/겔) 내에서 QD를 물리적으로 포획하거나 화학적으로 고정하여 용출을 저감하고, 공정(코팅/프린팅/성형)에 필요한 점도·탄성·가공창(process window)을 제공한다.<sup>8,9</sup> 더 나아가, 계면에서의 에너지 전달(energy transfer), 전하 이동, 굴절률 매칭, 수분 차단성 등은 고분자 설계에 의해 광학/전자 발광체(probe)로 전환될 수 있어, QD-고분자 결합은 안정화 전략을 넘어 기능 집적 플랫폼으로 진화하고 있다. 본 특집에서는 기능성 고분자와 결합된 QD 기술을 계면 제어 중심 접근과 고분자 매트릭스 내 분산 및 고정 중심 접근으로 나누어 정리하고, 응용 관점에서의 설계 논리를 제시하고자 한다.

Author



양현승

2010 KAIST 생명화학공학과 (학사)  
2012 KAIST 생명화학공학과 (석사)  
2016 KAIST 생명화학공학과 (박사)  
2016-현재 한국전자기술연구원 책임연구원



박찬호

2013 KAIST 생명화학공학과 (학사)  
2015-2019 KAIST 생명화학공학과 (석/박사)  
2019-2022 Stanford University (Post-Doc.)  
2022-현재 가천대학교 조교수

## 2. 본론

### 2.1 고분자 리간드-양자점 인터페이스

양자점 표면에 고분자 리간드(브러쉬)를 형성하면 (i) 분산 안정성 및 용매/매트릭스 적합성 향상, (ii) 표면 전하·친수/소수성·특이 결합기 제어, (iii) 자극(염, pH, 온도 등)에 따른 사슬 재배열을 통한 계면(인터페이스) 기능화가 가능해진다. 최근 연구는 브러쉬 자체를 기능성 플랫폼으로 활용하여 자기조립 구조 제어, fluorescence resonance energy transfer (FRET) 기반 센싱, 바이오 인터페이스, 패터닝 기반 광학 소자로서의 연구가 활발히 진행되고 있다.

KAIST 김범준 교수 연구팀은 산화그래핀 시트(GO)를 플랫폼으로 사용하고, pH 반응성 고분자 리간드(poly(acrylic acid), poly(2-vinylpyridine))를 통해 청색·주황 발광 Cd계 QD를 단일 GO에 집적하여 pH에 따라 QD에서 GO로 에너지 전달(FRET)이 달라지는 색변화 pH 나노센서를 구현하였다.<sup>10</sup> 이어 해당 연구팀은 ~10 nm 탄소양자점 표면에 poly(N-isopropylacrylamide)기반 형광 블록공중합체를 grafting-from<sup>14</sup>으로 성장시킴으로써 다양한 자극(온도·pH·금속 이온)에 따라 두 발광 성분의 상대 거리가 조절되어 FRET 메커니즘이 가역적으로 On-Off 되는 광학 나노 멀티센서 플랫폼을 제시하였다(그림 1a).<sup>15</sup>

Moffitt 연구팀은 poly(styrene)-b-poly(acrylic acid)-b-poly(methyl methacrylate)(PS-b-PAA-b-PMMA) 블록 공중합체 기반 미셀에서 CdS QD를 성장시키고, QD 표면에 혼합 PS/PMMA 리간드층을 형성하여 용매 극성에 따른 사슬 형태 변화로 콜로이드 안정성을 유지하는 환경반응형

QD를 제시하였다. 이로 인해, QD의 광학 특성은 용매에 거의 독립적이며 최대 6개월 장기 안정성을 확보할 수 있었다. 나아가 혼합 브러쉬의 재배열에 의해 PS 및 PMMA 호모폴리머 모두에 분산 가능함을 보여 고분자 매트릭스 적용 범위를 확장하였다.<sup>16</sup> 또한 해당 팀에서는 CdS QD 코어에 고밀도 및 비대칭 조성의 PS/PMMA 혼합 브러쉬를 제조하고, 수계에서 염(salt) 존재 유무에 따라 단일 core-shell 콜로이드 또는 Janus 입자 형성 후 베지클로 자기조립되는 두 경로로 형태가 스위칭됨을 보고하여 양자점의 자기조립 조절 응용성을 보였다.

그 외에도 양자점 표면 개질을 통한 기능성 고분자 리간드(브러쉬)는 항균 성능, 패터닝, 발광 특성 유지, 광산란 조절, 매트릭스 특성 조절 등의 기술에 적용 및 연구되고 있다. Lei Ye 연구팀은 탄소양자점에 암모늄 기반 양이온성 고분자 브러쉬를 결합해 박테리아에 대한 항균 특성을 부여했다.<sup>22</sup> Ober 연구팀은 고분자 브러쉬층과 electron-beam lithography를 결합하여 탄소양자점의 국소 농도 및 공간 배열을 나노 스케일에서 정밀 제어하고, 외부 자극에 따른 발광 특성의 가역적 변화가 가능한 박막을 구현했다(그림 1b).<sup>11</sup> 서강대학교 강문성 교수 연구팀은 QD 표면 리간드/가교제의 광반응을 이용해 QD 박막을 국부적으로 불용화(내화학성 부여)시키는 리간드 가교 기반 직접 포토패터닝하는 연구를 진행하였다.<sup>23,24</sup> Rider 연구팀은 발광 태양 집광기에서 QD 응집으로 인한 산란 손실이 커지는 문제가 있는데, 연구진은 PMMA 매트릭스와 조성이 동일한 PMMA 고분자 리간드를 copper indium sulfide (CIS)/ZnS QD에 치환해 PMMA 웨이브가이드에 도입함으로써 응집을 억제하고 높은 함량에서도 산란(파라사이트) 손실을

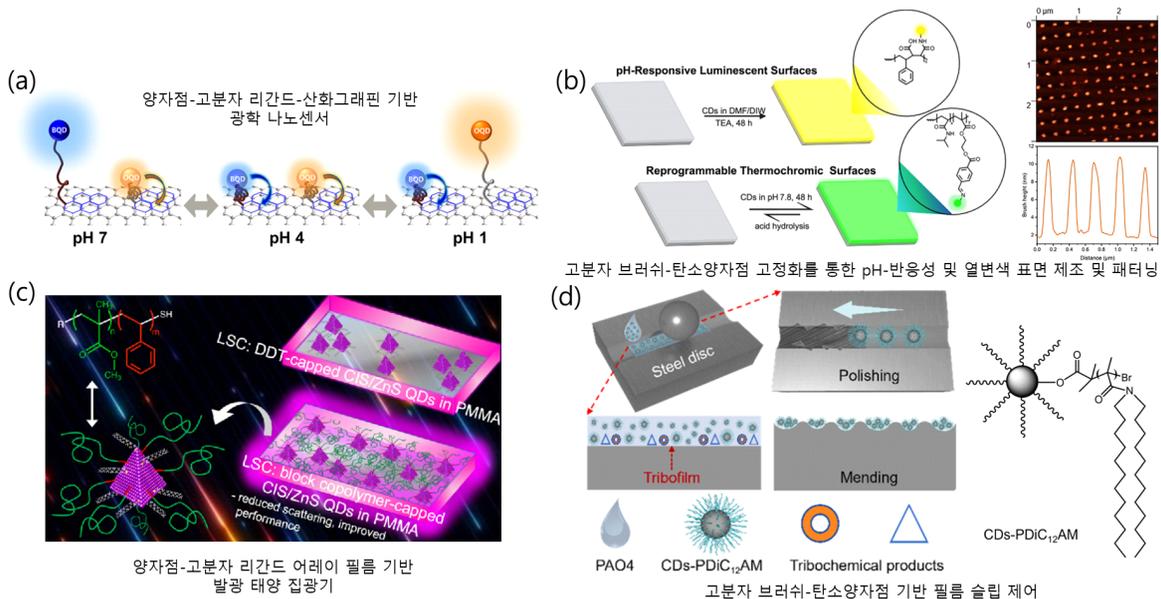


그림 1. (a) pH 반응성 고분자를 링커로 한 양자점-산화그래핀 복합 센서.<sup>10</sup> (b) 기능성 고분자 브러쉬-탄소양자점 결합을 통한 양자점 나노 패터닝.<sup>11</sup> (c) 양자점-고분자 리간드 어레이 필름 구현을 통한 발광 태양 집광기.<sup>12</sup> (d) 고분자 브러쉬-탄소양자점 복합체의 윤활 특성.<sup>13</sup>

감소시켜 광학 성능을 개선했다(그림 1c).<sup>12</sup> Lu 연구팀은 수용성인 기존 탄소양자점의 한계를 해결하기 위해, 비극성 오일과 조성이 유사한 알킬계 모노머를 중합해 폴리머 브러쉬-그래프트 탄소양자점을 오일에 용해시켰다. 그 결과 윤활유 (poly- $\alpha$ -olefins)에서 고분자 브러쉬의 트리보반응에 의한 보호 윤활막이 형성됨으로써, 장기 분산 안정성과 함께 1 wt% 첨가시 마찰계수 64%, 마모체적 50% 감소를 보였다(그림 1d).<sup>13</sup>

## 2.2 고분자 매트릭스 내 양자점

양자점을 고분자 매트릭스 내에 분산시키는 기술은 양자점의 응집 방지, 안정성 향상, 양자점의 가공성 개선에 필수적이며, 양자점이 최종 적용되는 분야에 따라 다양한 양자점/고분자 복합 시스템이 개발되어 왔다. 본 절에서는 마이크로비드 시스템, 블록공중합체 입자 시스템, 하이드로겔/오가노겔 시스템으로 구분하여 양자점/고분자 복합체의 최신 연구 동향을 소개한다.

### 2.2.1 마이크로비드 시스템

고분자 마이크로비드 내부에 양자점을 도입하는 기술은 광학 바코딩, 광학 센서 등 다양한 응용분야에 적용될 수 있다. 양자점을 고분자 마이크로비드 내에 효과적으로 분산시키기 위해서는 양자점 표면의 리간드와 고분자 매트릭스 간의 상호작용을 정밀하게 제어해야 하며, 이를 위해 팽윤법, Layer-by-Layer(LbL), 양자점 표면의 리간드와 고분자 매트릭스 간 공유 결합을 이용한 중합법 등 다양한 방법이 개발되어 왔다(그림 2a).

팽윤법은 고분자 비드를 유기 용매에 팽윤시킨 후 양자점을 확산시켜 내부에 도입하는 방법으로, 공정이 간단하고 도입되는

양자점의 함량 조절이 용이하다는 장점이 있다. Shuming Nie 교수 연구팀은 이 방법을 적용하여 사이즈가 조절된 CdSe/ZnS 양자점을 가교된 PS 마이크로비드에 정밀하게 도입하여 다중 광학 코딩 시스템을 구현하였고, 마이크로비드 내 도입되는 양자점의 6가지 색상 조합과 10단계 세기 조절을 통해 이론적으로 백만 개의 바코드 생성이 가능함을 확인하였다.<sup>17</sup> 또한, LbL 방식은 양전하와 음전하를 띤 물질을 교대로 다층막을 형성하는 기술로, 고분자 매트릭스 내 양자점 함량을 정밀하게 제어할 수 있다는 장점이 있다. Frank Caruso 교수 연구팀은 이 방식을 적용하여 poly(electrolyte) 가 코팅된 PS 마이크로비드 표면에 CdTe 양자점을 정전기적 상호작용을 통해 순차적으로 흡착시켰고, TEM 분석을 통해 PS 마이크로비드 표면에 균일한 CdTe 코팅층이 형성됨을 확인하였다.<sup>25</sup> 한편, 무기계 양자점 이외에도 탄소계 양자점을 고분자 마이크로비드 내부에 복합하는 연구 결과도 발표된 바 있다. 양현승 박사 연구팀은 커피 유래 탄소 양자점을 Polyethylene glycol diacrylate(PEGDA) / sodium acrylate 기반의 가교된 마이크로겔 내부에 캡슐화 하였다.<sup>26</sup> 탄소 양자점 표면의 산소 기능기와 마이크로겔 간 수소 결합을 통해서 마이크로겔 내부에 탄소 양자점의 분산성을 확보할 수 있었고, 제조된 마이크로겔은 탄소 양자점의 독특한 발광 특성을 이용하여 Fe<sup>3+</sup> 이온 검출이 가능한 형광 센서로도 활용가능한 것을 확인하였다. 한편, 양자점을 고분자 매트릭스에 공유 결합으로 고정시키는 방법은 비공유 결합 방식에 비해 양자점의 dissolution을 방지하고 장기 안정성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. Andrew J. Sutherland 교수 연구팀은 중합 반응에 참여 가능한 리간드로 표면 개질된 CdSe 양자점을 현탁 중합법으로 PS 비드에 공유 결합시킴으로써 안정적으로

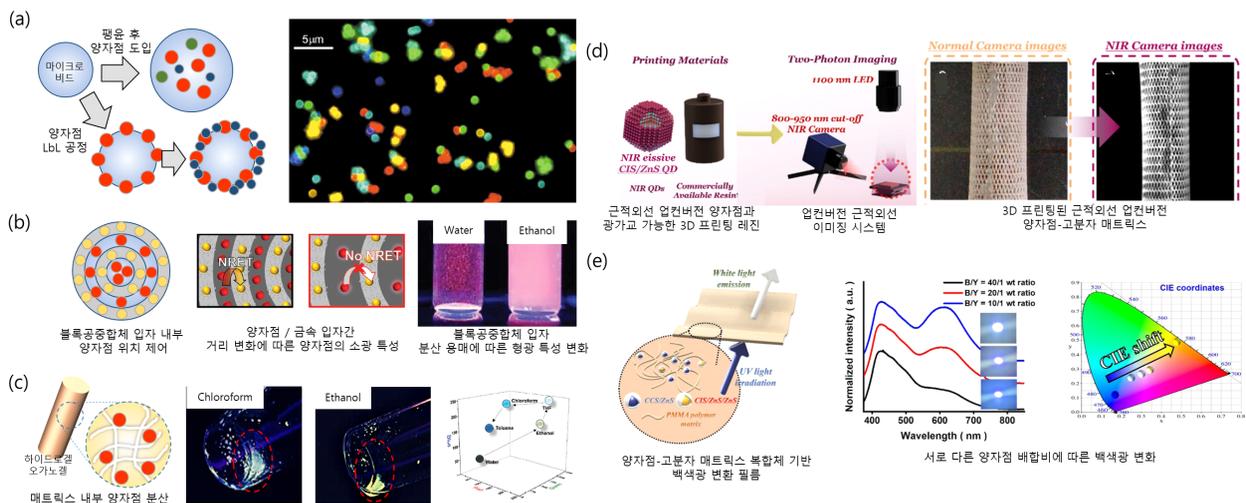


그림 2. (a) 마이크로비드 내/외부 양자점 결합 및 이종의 양자점이 내부에 복합된 마이크로비드의 형광 이미지.<sup>17</sup> (b) 양자점 복합 블록공중합체 입자의 외부 환경 (용매) 변화에 따른 양자점의 형광 특성 변화.<sup>18</sup> (c) 탄소계 양자점 복합 오가노겔의 다양한 유기 용매 노출에 따른 발광 특성 변화.<sup>19</sup> (d) 3D 프린팅 고분자 매트릭스 내 근적외선 양자점 시스템.<sup>20</sup> (e) 양자점 배합비 조절을 통한 백색광 변환 필름 제조 및 고정밀 색도 조절.<sup>21</sup>

복합하는 연구 결과를 발표하였다.<sup>27</sup>

### 2.2.2 블록공중합체 입자 시스템

블록공중합체는 화학적으로 구별되는 고분자 블록 간의 상분리를 통해 자기조립되어 나노미터 수준의 규칙적인 구조 (Lamellar, Cylinder, Sphere)를 형성한다. 이러한 구조는 양자점의 위치를 나노미터 수준에서 정밀하게 제어하는 데 활용될 수 있으며, 특히 서로 다른 색상의 이종의 양자점을 서로 다른 고분자 도메인에 선택적으로 배치하여 양자점간 FRET를 억제하고 다색 발광을 구현하는 데 효과적이다. 이를 통해서 광학 바코딩, 자극 감응형 광학 소자, 포톤 결정 등 다양한 응용이 가능하다.<sup>18,28,29</sup> 김범준 교수 연구팀에서는 PS-b-P4VP 블록공중합체 micelle에 pentadecylphenol을 단분자 linker로 도입하여 청색(CdS/ZnS) 및 주황색(CdSe/ZnS) 양자점을 P4VP 코어 도메인에 선택적으로 배치하였다.<sup>28</sup> Pentadecylphenol의 phenol 그룹은 4-vinylpyridine과 수소 결합을 형성하고, alkyl기는 양자점 표면의 리간드와 소수성 상호작용을 통해 양자점을 micelle 코어에 안정적으로 고정시킬 수 있었다. 이를 통해서 서로 다른 색상의 양자점을 각각 독립된 micelle에 도입한 후 자기조립을 통해 라즈베리 유사 표면 구조를 갖는 블록공중합체입자를 제조하였다. Micelle 코어 간 거리가 FRET 반경을 초과하여 두 양자점 간 FRET이 완전히 억제되었으며, 두 양자점의 비율을 조절함으로써 청색에서 주황색까지 다양한 단일 여기 파장에서 다중 색상 발광이 가능한 광학 소재로의 응용 가능성을 제시하였다 (그림 2b).

블록공중합체의 용매 감응성을 활용하여 외부 자극에 의해 광학 특성이 변화하는 블록공중합체 입자를 구현한 연구도 소개된 바 있다.<sup>18</sup> 동일 연구팀에서는 PS-b-P4VP 블록공중합체 입자를 템플릿으로 활용하여 Au 나노입자와 양자점을 이중 교대층으로 배열하는 기술을 개발하였고, 이 구조에서 Au 나노입자는 나노금속 에너지 전달을 통해 양자점의 형광 소광이 가능하다. 물에서는 층간 거리가 가까워 형광이 소광되고, 에탄올에서는 P4VP 도메인의 팽윤으로 층간 거리가 증가하여 형광 강도가 향상되었다. 이를 통해서 자극 감응형 광학 소자 및 보안 잉크로의 응용 가능성을 제시하였다.

### 2.2.3 하이드로겔/오가노겔 시스템

하이드로겔과 오가노겔은 3차원 네트워크 구조로 양자점을 효과적으로 분산 및 안정화시킬 수 있으며, 생체적합성으로 바이오메디컬 응용에 적합하다. 특히, 하이드로겔/오가노겔 매트릭스의 다공성 구조는 분석 대상 물질의 확산을 가능하게 하면서 동시에 양자점의 dissolution을 방지하는 반투과성 막 역할을 할 수 있어서, 외부 자극 감응형 고분자를 매트릭스로

활용하면 외부 환경 변화에 따라 형광 특성이 가역적으로 변화하는 스마트 센서를 구현할 수 있다. Dayang Wang 연구팀에서는 pH 감응성 poly(N-isopropylacrylamide-co-4-vinylpyridine) 하이드로겔 스피어를 콜로이드 담체로 활용하여 서로 다른 크기의 수용성 CdTe 양자점을 캡슐화하는 방법을 개발하였다.<sup>30</sup> 하이드로겔 스피어는 계면활성제 없이 유화 중합법으로 제조하였으며, 4-vinylpyridine의 양성자화에 의해 pH에 따라 기공 크기가 조절될 수 있다. pH 3 조건에서 하이드로겔이 팽윤되면 기공 크기가 CdTe 양자점(2.5, 3, 4 nm)보다 커져 양자점이 내부로 흡수되고, pH가 증가하면 하이드로겔 네트워크가 수축하여 양자점이 물리적으로 포획될 수 있다. 서로 다른 크기의 양자점을 순차적으로 도입함으로써 단일 마이크로스피어 내에서 다색 발광이 가능한 광학 시스템을 구현하였다.

한편, 무기계 양자점 외에도 탄소 양자점도 하이드로겔/오가노겔 매트릭스에 복합되어 기능성 복합체로 구현된 예시가 있다. 탄소 양자점이 중금속 이온 또는 용매의 극성 변화에 따라서 소광하게 되는 독특한 특성을 이용하여 탄소 양자점이 복합된 하이드로겔/오가노겔을 광학 센서등으로 구현된 바 있다.<sup>19,31</sup> Devasish Chowdhury 연구팀에서는 키토산 유래 탄소 양자점과 아가로스 하이드로겔을 결합하여 중금속 이온(Cr<sup>6+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> 등) 검출 및 분리용 고체 센싱 플랫폼을 개발하였다.<sup>31</sup> 양전하를 띤 탄소 양자점과 음전하를 띤 아가로스 하이드로겔 매트릭스간의 정전기적 상호작용을 통해 안정적인 하이브리드 필름을 제조하였다. 이 하이드로겔 필름은 다양한 금속 이온에 대한 색상 변화를 나타내어 신속한 현장 검출 센서로 활용 가능성을 입증하였다. Solvatochromic 현상은 용매의 극성에 따라 형광체의 발광 파장이 변화하는 현상으로, 이를 활용하면 유기 용매의 종류를 광학적으로 구별하는 센서를 개발할 수 있다. 양현승 박사, 박찬호 교수 연구팀에서는 높은 광발광 양자효율과 우수한 광안정성을 나타내면서 용매 극성에 따라 가시광 영역 전체에서 solvatochromic 특성을 갖는 질소와 황 원소가 동시에 도입된 탄소 양자점을 합성하였고, 이를 PEGDA 매트릭스에 복합하여 원통형 마이크로겔 및 필름 형태의 오가노겔 복합체를 제작하였다.<sup>19</sup> 오가노겔의 메시 크기가 탄소 양자점 크기보다 작아 탄소 양자점의 누출 없이 용매 분자만 투과하는 반투과성 구조를 구현하였다. 구현된 오가노겔 센서는 10회 이상의 반복적인 유기 용매 교환에도 solvatochromic 응답이 유지되어 재사용이 가능한 센서로 활용 가능성을 입증하였다(그림 2c). 또한 해당 연구팀은 CuInS<sub>2</sub>/ZnS QD를 템플릿-보조 양이온 교환으로 합성해 NIR-I 업컨버전 발광을 구현하고, QD를 PEGDA 기반 광경화 레진에 균일 분산시키고, DLP 3D 프린팅으로 QD-내장 스케폴드/스텐트를 제작하여 1,100 nm LED 기반 근적외선 업컨버전 이미징을 구현하였다

(그림 2d).<sup>20</sup> 또한, Cd-free 청색 CuCrS<sub>2</sub>/ZnS QD-황색 (CuInS<sub>2</sub>/ZnS/ZnS QD) 이중 발광체를 PMMA에 공분산시켜 배합비만으로 친환경 백색광 변환 필름을 제조하여, 고분자 매트릭스 기반의 실용형 색도 튜닝 전략을 제안하였다 (그림 2e).<sup>21</sup>

### 3. 결론

본 특집에서는 기능성 고분자와 결합된 양자점 기술을 (i) 고분자 리간드/브러쉬 기반 계면 제어와 (ii) 고분자 매트릭스 내 분산 및 고정, 두 축으로 정리하였다. 기능성 고분자 복합체는 양자점의 표면 결합 및 계면 상호작용을 제어(패시베이션·에너지 전달)하고, 응집·용출과 이에 따른 광학 손실(산란/소광)을 억제하며, 필름화·패터닝·3D 프린팅 등 공정 호환성을 동시에 확보하는 핵심 전략이 가능하도록 한다. 특히 브러쉬/리간드 접근으로 FRET 기반 센싱, 자기조립 구조 제어, 나노패터닝, 바이오 인터페이스 등 기능 고도화를 구현하였다. 매트릭스 기반 접근은 마이크로비드·블록공중합체·겔 네트워크와 같은 구조화된 공간에서의 안정 담지를 통해 보안 잉크·광학 바코딩·근적외선 이미징·백색광 변환 필름 등 실용 응용을 가속하고 있다. 향후에는 응용별 요구 성능에 맞추어 리간드 및 브러쉬의 구조(사슬 길이·밀도·조성)와 분산/광학 성능 상관관계의 정량화, 장기 안정성 평가 표준화, 그리고 환경/생체 안정성, 가격, 양산 가능성 확립이 병행되어야 하며, 이를 통해 기능성 고분자-양자점 결합은 안정화 보조기술 수준을 넘어 차세대 광원, 센서, 스마트 표면 소재의 핵심 플랫폼으로 자리 잡을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- N. Tomczak, D. Janczewski, M. Y. Han, and G. J. Vancso, *Prog Polym Sci.*, **34**, 393 (2009).
- S. Y. Lim, W. Shen, and Z. Q. Gao, *Chem. Soc. Rev.*, **44**, 362 (2015).
- L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C. H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, and M. V. Kovalenko, *Nano Lett.*, **15**, 3692 (2015).
- X. Tang, M. M. Ackerman, M. L. Chen, and P. Guyot-Sionnest, *Nat. Photon.*, **13**, 277 (2019).
- A. C. Berends, J. D. Meeldijk, M. A. van Huis, and C. D. Donega, *Chem. Mater.*, **29**, 10551 (2017).
- H. D. Zang, H. B. Li, N. S. Makarov, K. A. Velizhanin, K. F. Wu, Y. S. Park, and V. I. Klimov, *Nano Lett.*, **17**, 1787 (2017).
- R. Hardman, *Environ. Health Perspect.*, **114**, 165 (2006).
- C. H. Park, S. Lee, G. Pornnoppadol, Y. S. Nam, S. H. Kim, and B. J. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 9023 (2018).
- J. Lee, H. Yang, C. H. Park, H. H. Cho, H. Yun, and B. J. Kim, *Chem. Mater.*, **28**, 3446 (2016).
- K. Paek, H. Yang, J. Lee, J. Park, and B. J. Kim, *ACS Nano*, **8**, 2848 (2014).
- G. A. Eken, N. Chalmers, Y. M. Huang, E. P. Giannelis, and C. Ober, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **64**, 27 (2025).
- K. C. Koch, D. Korus, J. Doyle, M. Plummer, M. Boxx, H. Win-Piazza, S. McDowall, D. L. Patrick, and D. A. Rider, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **4**, 3283 (2022).
- S. W. Chen, Q. Q. Chen, B. G. Wang, and H. S. Lu, *Colloid Surf. A*, 704 (2025).
- A. J. Trowbridge, G. F. Huldin, M. Pyo, K. M. Jordan, M. A. Rincon, T. Kim, M. J. Webber, H. F. Gao, C. H. Park, and K. X. Fu, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **7**, 15241 (2025).
- C. H. Park, H. Yang, J. Lee, H. H. Cho, D. Kim, D. C. Lee, and B. J. Kim, *Chem. Mater.*, **27**, 5288 (2015).
- Y. Guo and M. G. Moffitt, *Macromolecules*, **40**, 5868 (2007).
- M. Y. Han, X. H. Gao, J. Z. Su, and S. Nie, *Nat. Biotechnol.*, **19**, 631 (2001).
- T. Kim, M. Xu, Y. J. Lee, K. H. Ku, D. Shin, D. C. Lee, S. G. Jang, H. Yun, and B. J. Kim, *Small*, **17**, 28 (2021).
- G. Jeong, T. Kim, S. D. Park, M. J. Yoo, C. H. Park, and H. N. Yang, *Macromol. Rapid Commun.*, **45**, 3 (2024).
- H. K. Lee, T. Kim, Y. A. Jang, Y. Jeong, S. W. Lee, and C. H. Park, *Adv. Mater.*, **37**, 24 (2025).
- H. K. Lee, J. H. Kim, I. T. Kim, D. H. Lee, and C. H. Park, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **12**, 2588 (2024).
- Q. C. Zhang, S. Chen, X. T. Xue, S. Hajizadeh, T. Yamazaki, and L. Ye, *ACS Omega*, **10**, 14536 (2025).
- D. Hahm, J. Lim, H. Kim, J. W. Shin, S. Hwang, S. Rhee, J. H. Chang, J. Yang, C. H. Lim, H. Jo, B. Choi, N. S. Cho, Y. S. Park, D. C. Lee, E. Hwang, S. Chung, C. M. Kang, M. S. Kang, and W. K. Bae, *Nat. Nanotechnol.*, **17**, 952 (2022).
- J. Yang, D. Hahm, K. Kim, S. Rhee, M. Lee, S. Kim, J. H. Chang, H. W. Park, J. Lim, M. Lee, H. Kim, J. Bang, H. Ahn, J. H. Cho, J. Kwak, B. Kim, C. Lee, W. K. Bae, and M. S. Kang, *Nat. Commun.*, **11**, 1 (2020).
- D. Y. Wang, A. L. Rogach, and F. Caruso, *Nano Lett.*, **2**, 857 (2002).
- G. Jeong, C. H. Park, D. C. Yi, and H. Yang, *J. Cleaner Product.*, 392 (2023).
- P. O'Brien, S. S. Cummins, D. Darcy, A. Dearden, O. Masala, N. L. Pickett, S. Ryley, and A. J. Sutherland, *Chem. Commun.*, **20**, 2532 (2003).
- K. H. Ku, M. P. Kim, K. Paek, J. M. Shin, S. Chung, S. G. Jang, W. S. Chae, G. R. Yi, and B. J. Kim, *Small*, **9**, 2667 (2013).
- S. Bertucci, D. Piccinotti, M. Garbarino, A. Escher, G. Bravetti, C. Weder, P. Lova, D. Comoretto, U. Steiner, F. Di Stasio, and A. Doderio, *Nanoscale*, **17**, 10194 (2025).
- M. Kuang, D. Y. Wang, H. B. Bao, M. Y. Gao, H. M. Öhwald, and M. Jiang, *Adv. Mater.*, **17**, 267 (2005).
- N. Gogoi, M. Barooah, G. Majumdar, and D. Chowdhury, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 3058 (2015).