

1 고색순도 유기전계발광다이오드 구현을 위한 다중공명효과 열활성지연형광 소재 연구 동향

글_이찬희 석사과정 · 이세연 교수 | 동국대학교 융합에너지신소재공학전공

1. 서론

정보통신기술의 발전과 함께 다양한 전자정보기기들이 개발되면서, 대량의 정보를 제공하기 위한 고성능 디스플레이의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 스마트폰, 태블릿 PC, 스마트워치 등의 휴대용 전자기기가 대중화되면서 기존의 일반적인 평판 디스플레이가 제공하던 기능에 더하여 유연하고, 접을 수 있으며 신축성을 갖춘 기능성 디스플레이의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 기능성 디스플레이의 수요 증가와 함께 유기물 광반도체인 유기전계발광다이오드(organic light emitting diode, OLED)를 활용한 디스플레이가 주목을 받고 있다. OLED는 음극(anode)과 양극(cathode) 두 전극 사이에 위치하고 있는 유기물층에 정공(hole)과 전자(electron)가 주입

되어 재결합(recombination)에 의해 형성된 여기자(exciton)로 인해 빛을 발현하는 광반도체의 한 종류이다. OLED에 사용되는 기관의 종류에 따라 유연성, 신축성을 가지는 디스플레이 제작이 가능하고, 수백 나노미터의 매우 얇은 박막으로 구성되어 가볍고 투명한 디스플레이 제작이 가능한 장점을 가지고 있어 최신 전자정보기기에 널리 활용되고 있다.

Anthracene을 활용한 단일 유기물층으로 구성된 최초의 OLED [1]가 1965년 보고된 이래로, 구동전압을 낮추고 전력효율을 증가시키기 위한 전하수송(charge transport) 소재 및 다층 소자 구조 [2-5], 외부양자효율(external quantum efficiency, EQE)을 향상시키기 위한 다양한 유기발광 소재 [6-12]의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 유기발광 소재는 전자와 정공의 재결합에 의해 형성된 여기자 중 어떤 여

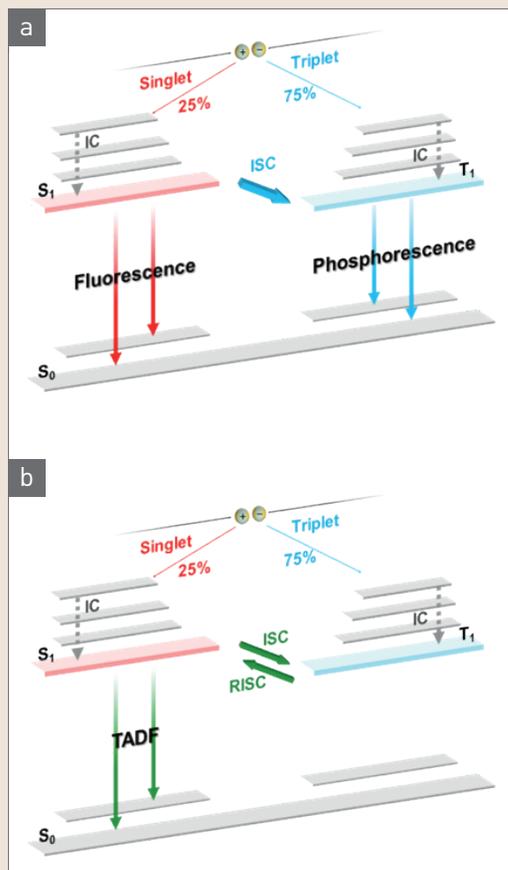


그림 1 ▶ (a) 형광(fluorescence) 및 인광(phosphorescence)의 발광 메커니즘, (b) 지연형광 중 열활성지연형광(thermally activated delayed fluorescence)의 발광 메커니즘.

기자를 사용하여 빛을 발현하는가에 따라 형광(fluorescence) [6,7], 인광(phosphorescence) [8,9], 지연형광(delayed fluorescence) [10-12] 소재로 구분된다 (그림 1). 발광소재 중 가장 먼저 OLED에 활용된 형광 소재는 전자와 정공의 재결합에 의해 1:3의 비율로 형성된 일중항(singlet)과 삼중항(triplet) 여기자 중, 일중항 여기자만을 발광에 사용할 수 있어 여기자 생성효율(exciton production efficiency)이 25% 인 단점을 가지고 있다. 인광 소재는 유

기물과 원자번호가 큰 이리듐(Ir), 백금(Pt), 구리(Cu), 등의 금속으로 이루어진 유기금속화합물(organometallic complex)로 삼중항 여기자에 의해 빛을 발현한다. 이때, 인광 소재에 포함된 원자번호가 큰 금속들의 중원소 효과(heavy-atom effect) [13]에 의한 스핀-궤도 상호작용(spin-orbital coupling) [14]이 촉진되어 일중항에서 삼중항으로 여기자가 계간전이(intersystem crossing, ISC) 될 수 있어 일중항과 삼중항 모든 여기자를 모두 발광에 사용할 수 있다. 그러나 높은 여기자 밀도(exciton density)와 형광 보다 상대적으로 긴 마이크로초(μs) 이상의 발광 수명(transient decay time)에 의한 여기자 소멸현상에 의해 EQE가 급격히 감소하는 문제점을 가지고 있다 [15-17]. 지연형광은 형광과 같이 일중항 여기자를 사용하여 발광을 하는 현상이지만, 형광과는 다르게 삼중항 여기자를 일중항 여기자로 역계간전이(reverse intersystem crossing, RISC)를 통해 전이시켜 발광에 활용하여 여기자 생성효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 전이 방식에 따라 삼중항-삼중항 소멸(triplet-triplet annihilation, TTA) [10]과 열활성지연형광(thermally activated delayed fluorescence, TADF) [11,12]로 구분할 수 있으며, 최근에는 열활성지연형광 소재를 기반으로 한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 열활성지연형광 소재의 경우, 0.3 eV 이하의 일중항과 삼중항 여기상태의 낮은 에너지 차이(singlet-triplet state energy, ΔE_{ST})를 가질 때, 열에너지에 의해서 발현되는 역계간전이에 의해서 삼중항에서

일중항 여기자로 전이될 수 있으며, 낮은 ΔE_{ST} 구현을 위해서 유기 발광 소재의 highest occupied molecular orbital (HOMO)와 lowest unoccupied molecular orbital (LUMO)의 겹침을 최소화하여야 한다 [18]. 이러한 발광 소재 설계를 위해 전자 주개(electron donating group)와 전자 받개(electron withdrawing group)가 조합된 전자 주개-받개(D-A) 형태의 전하 이동(charge transfer, CT) 소재 설계가

주를 이루고 있으며, 소재 내부에 뒤틀림 구조를 유도하여 겹침을 최소화하는 소재 설계 전략을 활용하고 있다 [18-23]. 그러나 전자 주개-받개를 기반으로 내부 뒤틀림 구조로 설계된 발광 소재의 경우, 넓은 반치전폭(full width at half maximum, FWHM)으로 인한 색순도 저하의 문제점을 가지고 있어 고색순도의 OLED를 구현하는데 어려움을 겪고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 최근 다중공명효과(multiple-resonance effect, MRE)를 활용한 열활성지연형광 소재들이 보고되고 있다 [24-37] (그림 2). 다중공명효과란, 기존의 전자 주개-받개 사이의 뒤틀림 구조를 통한 HOMO-LUMO의 분리법과는 다르게 전자 주개-받개가 사이의 뒤틀림 구조가 없이 반공명효과(opposite resonance effect)를 가지는 전자 주개-받개의 결합을 통해 HOMO-LUMO의 분리를 유도하는 소재 설계법으로, 기저 상태(ground state)와 여기 상태(excited state)의 소재 구조 변화를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 다중공명효과 기반의 발광소재는 흡수와 발광 파장의 차이인 Stokes shift를 줄이고, 기존의 anthracene, pyrene 등의 형광 소재들과 같이 매우 작은 반치전폭을 가지는 발광을 구현함으로써 기존의 열활성지연형광 소재 대비 고색순도의 발광 파장을 발현할 수 있다.

이에 본 기고에서는 최근 주목받고 있는 열활성지연형광 소재를 중심으로 고색순도 구현을 위해 개발 중인 다양한 다중공명효과 극소 반치전폭 발광 소재의 연구 동향에 대해서 다루고자 한다.

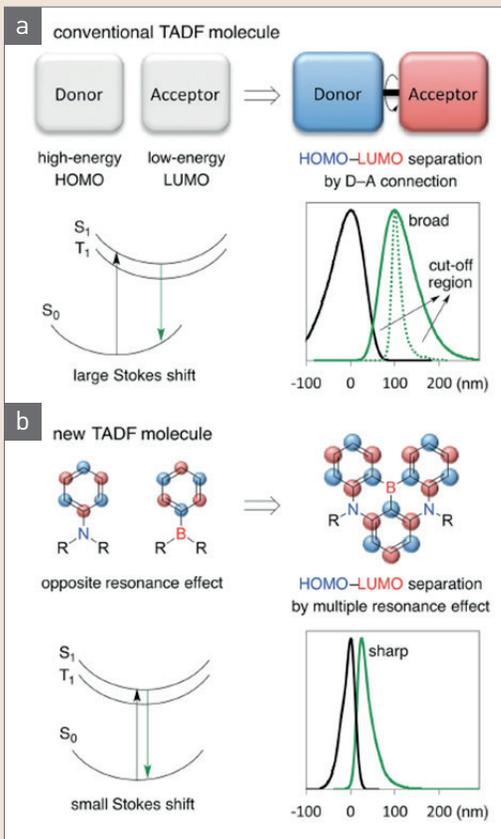


그림 2 ▶ (a) 일반적인 전하이동(charge transfer)기반의 열활성지연형광(thermally activated delayed fluorescence) 소재의 HOMO-LUMO 분리를 위한 소재 설계 및 큰 Stokes shift에 따른 색순도 감소 현상, (b) 다중공명효과(multiple resonance effect) 기반의 새로운 HOMO-LUMO 분리를 위한 소재 설계 및 작은 Stokes shift에 따른 고색순도 발광 특성 [24].

2. 다중공명효과 기반 열활성지연형광(MR-TADF) 소재 연구 동향

2.1 단일 붕소계 다중공명효과 발광 소재

2016년, Hatakeyama 교수 연구팀은 새로운 형태의 열활성지연형광 소재인 DABNA-1, DABNA-2를 학계에 보고하였다 [24] (그림 3(a)). 이 소재들은 다중공명효과를 이용한 열활성지연형광(MR-TADF) 소재로써 붕소(B)와 질소(N) 원소의 상반된 반공명효과를 활용하고 두 원소를 견고하게 결합된 방향족 고리 화합물 내부의 *para* 위치에 배치하여 다중공명효과를 유도하였다. DABNA-1, DABNA-2를 발광 소재로 활용한 OLED에서는 459, 467 nm의 전계발광(electroluminescence, EL)파장과 28 nm의 매우 작은 반치전폭이 관측되었으며, 국제조명학회(Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) 색좌표 (0.13, 0.09), (0.12, 0.13)의 매우 순수한 청색 발광을 보이는 OLED를 제작하는데 성공하였다. 하지만, 상대적으로 큰 ΔE_{ST} 와 낮은 역계간전이 속도 상수 (RISC decay rate constant, k_{RISC})로 인해 낮은 최대 휘도 (maximum luminance, L_{max})와 휘도 증가에 따른 급격한 EQE의 감소 등의 문제점이 발견되었다. 그럼에도 기존의 전하 이동 발광 기반의 열활성지연형광 소재에서는 관측할 수 없던 작은 반치전폭 발광 특성을 통해 열활성지연형광 소재의 가장 큰 난제였던 낮은 색순도에 대한 새로운 해결 방안을 제시하였다.

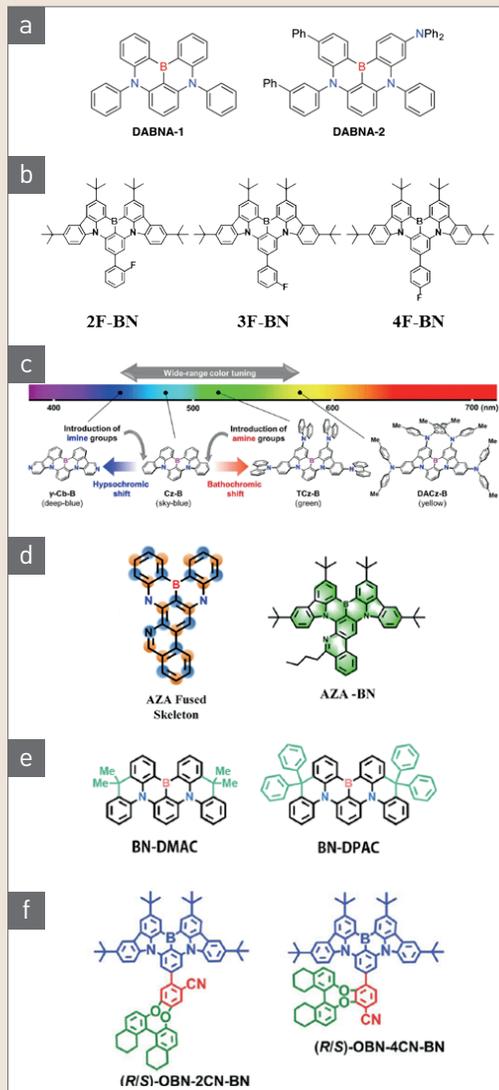


그림 3 ▶ 단일 붕소계 다중공명효과 열활성지연형광(MR-TADF) 소재 구조 [24-29].

Duan 교수 연구팀은 2019년 다양한 발광과 장 구현을 위한 새로운 MR-TADF 소재 설계 전략과 관련된 연구 결과에 대해 발표하였다 [25] (그림 3(b)). 기존에 보고되었던 DABNA 유도체에 3,6-di-*tert*-butylcarbazole을 도입한 2F-BN, 3F-BN, 4F-BN를 설계하고, 넓은 π -컨쥬게이션(π -conjugation)을 형성함으로써 oscillator

strength (f)의 증가 및 작은 HOMO-LUMO 에너지 레벨의 차이(ΔE_g)를 유도하였다. 또한 붕소의 *para* 위치의 탄소(C)에 LUMO가 형성된다는 점에 착안하여 동일한 위치에 전자 받개인 fluorobenzene을 도입함으로써 LUMO의 분포의 확장을 통해 녹색 발광 소재를 설계하였다. 이 유도체들을 활용하여 제작한 OLED로 20.9% 이상의 높은 최대외부양자효율(maximum EQE, EQE_{max})를 동반한 고색순도의 녹색 발광을 구현하는데 성공하였다.

최근 소재 말단에 치환기를 도입하여 발광 파장을 조절하는 기존의 MR-TADF 소재 발광 파장 조절 방법과 더불어 소재 내부의 원소를 치환하여 발광 파장을 변화시키는 새로운 소재 설계법이 Yasuda 교수 연구팀에 의해 보고되었다 [26] (그림 3(c)). 본 연구에서는 탄소 대신에 질소가 포함된 carboline을 활용한 γ -Cb-B와 소재 말단에 carbazole과 diphenyl amine이 도입된 Cz-B, TCz-B를 통해 청, 녹, 황색의 MR-TADF 소재를 설계하였으며, 이 소재를 활용하여 제작한 OLED 특성 평가 결과, 최대 EQE_{max} 29.2%, 청, 녹, 황색의 461, 515, 571 nm EL 파장과 함께 28, 30, 44 nm의 작은 반치전폭을 확인하였다. 이 연구 결과를 바탕으로 MR-TADF 소재 내부의 원소를 치환하는 새로운 발광 파장 조절 방법을 통해 높은 색순도를 구현할 수 있음을 확인하였다.

일반적인 열활성지연형과 소재 대비 MR-TADF 소재 낮은 EQE_{max}를 개선하기 위한 연구도 진행되고 있다. 2020년 Duan 교수 연구팀은 전하이동과 다중공명효과를 동시에 구

현(hybridized multi-resonance and charge transfer, HMCT)하여 MR-TADF 소재의 발광 효율을 향상시키기 위한 소재 설계법을 고안하였다 [27] (그림 3(d)). 이를 위해 MR-TADF 소재에 견고하게 연결된 aza-방향족 고리를 도입하여 뒤틀린 형태의 기존 다중공명효과 기반 발광 소재들보다 강한 분자 내 전하이동이 가능한 조건을 형성하였다. 또한, 새롭게 도입된 aza-방향족 고리의 질소 원소의 HOMO 분포와 소재의 비대칭성에 의한 LUMO 분포의 변화를 통해 분자 내 전하이동 특성 강화를 유도하였다. 이렇게 설계된 AZA-BN은 기존의 MR-TADF 소재특성과는 다르게 일반적인 전하이동 발광 기반 열활성지연형광 소재에서 관측되는 큰 Stokes shift와 용매 의존 발색 현상을 보임과 동시에, MR-TADF 소재의 특성인 34 nm의 작은 반치전폭을 보였으며, 이를 통해 전하이동과 다중공명효과가 혼합되어 있는 새로운 소재 특성을 확인하였다. AZA-BN 활용한 OLED의 특성 평가 결과, 28.2%의 높은 EQE_{max}를 달성하였다.

MR-TADF 소재기반 OLED의 EQE_{max} 개선과 함께, MR-TADF 소재의 긴 지연 형광 수명에 따른 고휘도에서의 심각한 EQE 감소 현상을 해결하기 위한 연구 결과도 보고되고 있다 [28] (그림 3(e)). Yang 연구팀은 분자간 응집 소광(aggregate quenching)에 의한 발광효율 감소를 막기 위해 소재의 말단에 methyl과 phenyl 같이 bulk한 치환기를 도입한 BN-DMAC, BN-DPAC 소재를 설계하였다. 이 소재에서는 기존의 MR-TADF 소재 대

비 큰 k_{RISC} ($1.26 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$)를 통해 지연 형광의 수명을 단축시킬 수 있었으며, 이 소재를 활용한 OLED에서 각각 녹색과 황색의 506, 608 nm EL 파장과 $\text{EQE}_{\text{max}}/\text{EQE}_{100}$ (휘도 100 cd m^{-2} 에 해당하는 EQE 값)/ EQE_{1000} (휘도 1,000 cd m^{-2} 에 해당하는 EQE 값) 25.5%/21.5%/16.0%, 30.2%/27.6%/22.1%의 휘도 증가에 따른 낮은 EQE 감소 결과를 보임으로써, 발광 분자간의 응집 소광을 해결하기 위한 새로운 소재 설계법을 검증하였다.

이 밖에도 Wang 교수 연구팀은 다중공명 효과 특성을 갖춘 원편광(circularly polarized light, CPL) 극소반치전폭 소재 연구를 수행하였다 [29] (그림 3(f)). BN유도체 [25]를 기반으로 붕소의 *para* 위치에 발색단인 benzonitrile과 원편광 발현을 위한 카이랄성 소재 설계를 위해 (*R/S*)-octahydro-binaphthol을 도입한 (*R/S*)-OBN-2CN-BN, (*R/S*)-OBN-4CN-BN 원편광 MR-TADF 소재를 보고하였다. 이 소재를 활용한 원편광 OLED는 29.4%의 EQE_{max} 와 30 nm의 작은 반치전폭 EL 파장을 보였으며, 전계발광 비대칭 계수(electroluminescence dissymmetry factor, g_{EL}) $+1.43 \times 10^{-3}/-1.27 \times 10^{-3}$, $+4.60 \times 10^{-4}/-4.76 \times 10^{-4}$ 를 달성하였다. 이 결과를 통해 간단한 소재 구조의 최적화를 통해, 작은 반치전폭을 가지는 고효율의 원편광 OLED를 구현할 수 있었다.

2.2 다중 붕소계 다중공명효과 발광 소재

붕소가 한 개만 포함되어 있는 단일 붕소계 MR-TADF 소재와 함께 여러 개의 붕소로 이

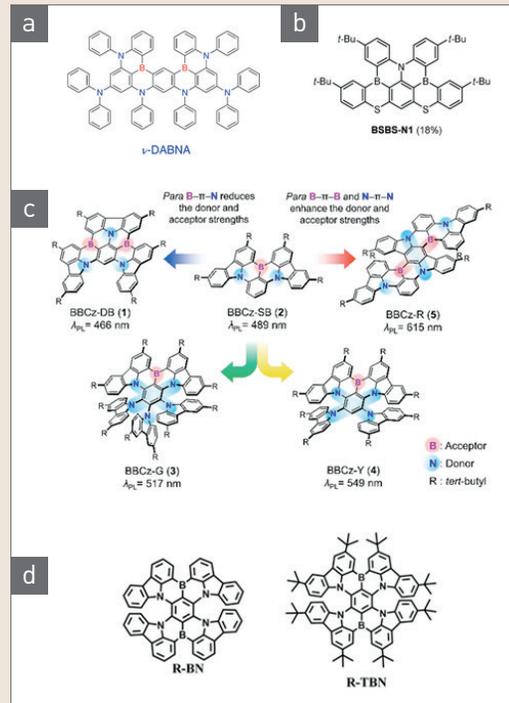


그림 4 ▶ 다중 붕소계 다중공명효과 열활성지연형광(MR-TADF) 소재 구조 [30-33].

루어진 다양한 다중 붕소계 MR-TADF 소재에 대한 연구도 진행되고 있다. Hatakeyama 교수 연구팀은 이중 붕소계 MR-TADF 소재인 *v*-DABNA를 보고하였는데 [30] (그림 4(a)), *v*-DABNA는 붕소와 질소에 의해 방향족 고리들이 견고하게 연결되어 있는 형태로 기존의 단일 붕소계 MR-TADF 대비 용액상에서 14 nm의 매우 작은 반치전폭 발광 파장을 보였다. 또한 편재화 된 HOMO, LUMO를 통해 0.0017 eV의 작은 ΔE_{ST} 를 달성할 수 있었다. *v*-DABNA기반 OLED에서는 34.4%의 높은 EQE_{max} 와 18 nm 작은 반치전폭의 청색 EL 파장이 관측되었으며, 휘도의 증가에 따른 EQE 감소 특성도 개선된 것($\text{EQE}_{\text{max}}/\text{EQE}_{100}/\text{EQE}_{1000}$,

34.4%/32.8%/28.0%)을 확인할 수 있었다.

기존의 MR-TADF 소재에는 사용되지 않았던 원소인 황(S)을 사용하여 소재를 설계한 다중 붕소계 발광 소재 연구 사례도 보고 되었다 [31] (그림 4(b)). Yasuda 교수 연구팀은 붕소, 질소, 황으로 이루어진 MR-TADF 소재인 BSBS-N1를 설계하였는데, 풍부한 전자를 가진 황으로 인해 다중공명효과와 증원소 효과를 동시에 유발하고 MR-TADF 소재의 역계간전이를 촉진하였다. 그 결과, 지금까지 보고된 소재들에 비해 개선된 k_{RISC} ($1.9 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$)와 짧은 지연 형광 발광 시간 ($5.6 \mu\text{s}$)을 달성하였다. 짧은 지연 형광 발광 시간으로 인해 OLED 소자에서는 휘도 증가에 따른 EQE 감소를 개선시킬 수 있었으며, EQE_{max} 21.0%, EL 파장 478 nm, 반치전폭 25 nm의 특성이 관측되었다.

또한 가시광 영역의 고색순도 극소반치전폭발광 소재의 최적화 연구를 통해 2020년 이중 붕소계 MR-TADF 소재 기반의 짙은 청색과 적색을 발현하는 소재, BBCz-DB, BBCz-R가 보고되었다 [32] (그림 4(c)). BBCz-DB의 경우, 벤젠을 기준으로 붕소와 질소가 마주해 있는 형태로 붕소- π -질소 컨쥬게이션(B- π -N conjugation)을 통해 소자 내의 전자 주개-받개 효과를 약화시켜 ΔE_g 의 증가 및 발광 파장의 감소를 유도하였다. 반면, BBCz-R는 붕소와 붕소, 질소와 질소가 서로 *para* 위치 치환된 소재 설계를 활용하여 전자 주개-받개 효과를 약화시키고 ΔE_g 의 감소 및 발광 파장의 증가를 유도하였다. BBCz-DB, BBCz-R를 사용한 OLED에서는 29.3, 22.0%의 EQE_{max}, 469, 616 nm

의 EL 파장, 27, 26 nm의 반치전폭이 관측되었으며, 견고하게 결합된 소재 구조를 통해 수평 배향을 유도하여 광방출효율(out coupling efficiency, η_{out})을 증가시킨 실험 결과도 확인할 수 있었다.

진한 적색과 근적외선 영역의 발광 파장을 가진 MR-TADF 소재에 대한 연구는 또한 진행되고 있다. 2021년, Duan 교수 연구팀은 근적외선 영역 발광 파장을 가지는 R-BN, R-TBN MR-TADF 소재를 보고하였다 [33] (그림 4(d)). 한 쌍의 붕소와 두 쌍의 질소가 서로 마주해 있는 소재 설계를 통해 전자 주개-받개 효과 강화를 유도하여 ΔE_g 의 감소를 이끌어냈으며, 근적외선 영역의 발광 파장을 위해 소재 말단에 *tert*-butyl group을 도입하였다. 또한 구조 최적화 및 양자화학계산 결과를 통해 재배열 에너지(reorganization energy)와 완화 에너지(relaxation energy)의 차이가 기존의 근적외선 소재들보다 작은 경향을 보였으며, 높은 f 와 방사 전이 속도 상수(radiative decay rate constant, k_r , $7.5\text{-}6.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$)를 확인하였다. OLED 실험 결과에서도 48, 49 nm의 작은 반치전폭을 가지는 664, 686 nm의 근적외선 영역 발광 파장에서 높은 25.6, 24.7%의 EQE_{max}를 달성하였다.

2.3 비 붕소계 다중공명효과 발광 소재

단일 또는 다중 붕소를 활용한 MR-TADF 소재 뿐만 아니라 비 붕소계 원소 기반의 MR-TADF 소재에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. Lee 교수 연구팀은 carbonyl group의 탄소도 붕소와 같이 sp^2 혼성화가 가능하다는

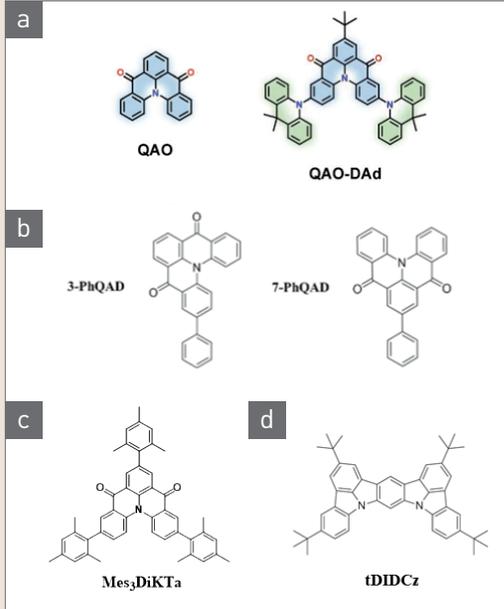


그림 5 ▶ 비 붕소계 다중공명효과 열활성지연형광(MR-TADF) 소재 구조 [34-37].

점에 착안하여 질소와 carbonyl group으로 이루어진 새로운 형태의 MR-TADF 소재인 QAO를 개발하였다 [34] (그림 5(a)). QAO를 활용한 OLED 측정 결과 EQE_{max} 19.4%, EL 파장 468 nm, 반치전폭 39 nm, CIE 색좌표 (0.13, 0.18)의 성능을 달성하였으며, 이를 통해 비붕소계 MR-TADF 소재의 실현 가능성을 확인하였다.

QAO 소재 구조 최적화를 통한 비 붕소계 MR-TADF 소재의 색순도 향상에 대한 연구 결과도 보고 되었다. Zhang 교수 연구팀은 QAO의 3번 위치에 phenyl group을 도입한 3-PhQAD와 7번 위치에 도입한 7-PhQAD를 설계하고 소재 구조적 대칭성에 따른 발광 파장의 변화에 대한 연구를 수행하였다 [35] (그림 5(b)). 비대칭 구조를 가지는 3-PhQAD는 대칭 구조를 가지는 7-PhQAD에 비해 더 복

잡한 energy level splitting에 의한 더 큰 44 nm의 반치전폭을 나타냈으며, 대칭구조를 가지는 7-PhQAD는 3-PhQAD대비 작은 34 nm의 반치전폭을 보이는 것을 확인하였다. 이 결과를 통해 비 붕소계 MR-TADF 소재의 색순도 개선 방안에 대한 소재 설계 방향을 제시하였다.

QAO의 소재의 발광 효율 증가를 위한 연구도 진행되고 있다. 2019년, E. Zysman-Colman 교수 연구팀은 QAO 소재 구조 최적화를 통해 휘도 증가에 따른 EQE 감소 문제를 해결하고자 하였다 [36] (그림 5(c)). 소재 말단에 mesityl group을 도입한 Mes₃DiKTa를 설계하여 응집 소광을 개선시키고 0.2 eV의 작은 ΔE_{ST} 를 가지는 소재 설계를 통해 100%에 가까운 삼중항 여기자 수득율을 기록하였다. Mes₃DiKTa 기반 OLED 특성 측정 결과, EL 파장 480 nm, 반치전폭 36 nm와 함께 기존의 QAO 기반 소자보다 개선된 21.1% EQE_{max} 와 낮은 휘도 감소율을 확인할 수 있었다.

앞서 서술된 carbonyl계열 비 붕소계 MR-TADF 소재와는 다른 형태의 새로운 MR-TADF 소재도 보고되고 있다. 이준엽 교수 연구팀은 질소, 탄소 계열기반의 자색 MR-TADF 소재인 tDIDCz를 설계하였다 [37] (그림 5(d)). 이 소재는 두 개의 indolocarbazole이 견고하게 연결된 방향족 고리 형태의 소재 구조를 통해 비 방사완화(non-radiative relaxation)에 의한 효율 감소를 억제하고 다중공명효과를 발현하기 위해 편재화된 HOMO와 LUMO를 유도하였다. tDIDCz 기반 OLED에서는 EL 파장 390 nm, 반치전폭 14 nm, CIE 색좌표 (0.164,

0.018)의 자색 발광 소자임에도 불구하고 2.75%의 EQE_{max} 와 200 cd m^{-2} 의 L_{max} 가 관측되었다. 이러한 결과는 질소와 탄소 계열을 이용한 새로운 형태의 비 붕소계 MR-TADF 소재를 통해 단파장 가시광 영역의 고효율 MR-TADF 소재 개발에 대한 가능성을 제시한 연구 결과라 할 수 있다.

3. 맺음말

차세대 디스플레이 광원으로 관심을 받고 있는 OLED의 효율 및 성능향상을 위해서는 기존의 형광 및 인광 소재를 대체할 수 있는 발광 소재들 특히, 고색순도를 가지는 고효율 유기발광 소재 개발이 매우 중요하다. 본 기고를 통해서, 기존의 유기발광 소재들이 가지는 문제점들을 해결하기 위한 다중공명효과 기반의 다양한 붕소계, 비 붕소계 극소반치전폭 열활성지연형광 소재의 연구 사례를 살펴보았다. 이러한 소재들이 상용화 되고 디스플레이에 적용되어 기존의 형광 및 인광 소재를 대체하는 새로운 열활성지연형광 소재로 활용되기 위해서는 소재가 가지는 낮은 안정성의 개선을 통한 소자 신뢰성 향상이 반드시 필요하다. 향후 발광 효율 및 색 순도 개선 뿐만 아니라 해당 소재들의 수명 향상을 위한 수명결정인자의 발굴과 열화 과정 분석 기반의 수명 감소 메커니즘 연구를 통해 소재 안정성을 향상시킬 수 있다면, 가까운 시일내에 OLED 차세대 디스플레이의 주요 광원으로 자리잡을 수 있을 것으로 기대한다. 🌟

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] W. Helfrich and W. G. Schneider, *Phys. Rev. Lett.*, **14**, 299 (1965).
- [2] C. W. Tang and S. A. Van sylke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913, (1987).
- [3] B. W. D'Andrade and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **16**, 1585 (2004).
- [4] T. D. Anthopoulos, J. P. J. Markham, E. B. Namdas, and I. D. W. Samuel, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4824 (2003).
- [5] S. A. Van Slyke, C. H. Chen, and C. W. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2160 (1996).
- [6] M. A. Baldo, B. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **403**, 750 (2000).
- [7] C. Adachi, M. A. Baldo, S. R. Forrest, and M. E. Thompson, *J. Appl. Phys.*, **11**, 285 (1999).
- [8] Y. Sun, N. C. Giebink, H. Kanno, B. Ma, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **440**, 908 (2006).
- [9] C. Adachi, M. A. Baldo, S. R. Forrest, and M. E. Thompson, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 904 (2000).
- [10] A. Maciejewski, M. Szymanski, and R. P. Steer, *J. Phys. Chem.*, **90**, 6314 (1986).
- [11] H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura, and C. Adachi, *Nature*, **492**, 234 (2012).
- [12] A. Endo, M. Ogasawara, A. Takahashi, D. Yokoyama, Y. Kato, and C. Adachi, *Adv. Mater.*, **21**, 4802 (2009).
- [13] M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **395**, 151 (1998).
- [14] C. Adachi, M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **90**, 5048 (2001).
- [15] S. Reineke, K. Walzer, and K. Leo, *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.*, **75**, 125328 (2007).
- [16] J. Kalinowskia and J. Mezyk, *J. Appl. Phys.*, **98**, 063532 (2005).
- [17] M. A. Baldo, C. Adachi, and S. R. Forrest, *Phys. Rev. B*, **62**, 10967 (2000).
- [18] Q. Zhang, B. Li, S. Huang, H. Nomura, H. Tanaka, and C. Adachi, *Nat. Photonics*, **8**, 326 (2014).
- [19] S. Y. Lee, T. Yasuda, H. Nomura, and C. Adachi, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 093306 (2012).
- [20] S. Y. Lee, T. Yasuda, H. Komiyama, J. Lee, and C. Adachi, *Adv. Mater.*, **28**, 4019 (2016).
- [21] S. H. Choi, C. H. Lee, C. Adachi, and S. Y. Lee, *Dyes Pigm.*, **171**, 107775 (2019).
- [22] S. H. Choi, C. H. Lee, C. Adachi, and S. Y. Lee, *Dyes Pigm.*, **172**, 107849 (2020).
- [23] C. H. Lee, S. H. Choi, S. J. Oh, J. H. Lee, J. W. Shim, C. Adachi, and S. Y. Lee, *RSC Adv.*, **10**, 42897 (2020).
- [24] T. Hatakeyama, K. Shiren, K. Nakajima, S. Nomura, S. Nakatsuka, K. Kinoshita, J. Ni, Y. Ono, and T. Ikuta, *Adv. Mater.*, **28**, 2777 (2016).
- [25] Y. Zhang, D. Zhang, J. Wei, Z. Liu, Y. Lu, and L. Duan, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **58**, 16912 (2019).
- [26] M. Yang, S. Shikita, H. Min, I. S. Park, H. Shibata, N. Amanokura, and T. Yasuda, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **60**, 1 (2021).
- [27] Y. Zhang, D. Zhang, J. Wei, X. Hong, Y. Lu, D. Hu, G. Li, Z. Liu, Y. Chen, and L. Duan, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **59**, 17499 (2020).
- [28] P. Jiang, L. Zhan, X. Cao, X. Lv, S. Gong, Z. Chen, C. Zhou, Z. Huang, F. Ni, Y. Zou, and C. Yang, *Adv. Optical Mater.*, **2100825** (2021).
- [29] Y. Xu, Q. Wang, X. Cai, C. Li, and Y. Wang, *Adv. Mater.*, **33**, 2100652 (2020).

- [30] Y. Kondo, K. Yoshiura, S. Kitera, H. Nishi, S. Oda, H. Gotoh, Y. Sasada, M. Yanai, and T. Hatakeyama, *Nat. Photonics*, 13, 678 (2019).
- [31] M. Nagata, H. Min, E. Watanabe, H. Fukumoto, Y. Mizuhata, N. Tokitoh, T. Agou, and T. Yasuda, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 60, 20280 (2021).
- [32] M. Yang, I. S. Park, and T. Yasuda, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 19468 (2020).
- [33] Y. Zhang, D. Zhang, T. Huang, A. J. Gillett, Y. Liu, D. Hu, L. Cui, Z. Bin, G. Li, J. Wei, and L. Duan, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 60, 20498 (2021).
- [34] Y. Yuan, X. Tang, X. Y. Du, Y. Hu, Y. J. Yu, Z. Q. Jiang, L. S. Liao, and S. T. Lee, *Adv. Optical Mater.*, 7, 1801536 (2019).
- [35] X. Li, Y. Z. Shi, K. Wang, M. Zhang, C. J. Zheng, D. M. Sun, G. L. Dai, X. CH. Fan, D. Q. Wang, W. Liu, Y. Q. Li, J. Yu, X. M. Ou, C. Adachi, and X. H. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 13472 (2019).
- [36] D. Hall, S. M. Suresh, P. L. dos Santos, E. Duda, S. Bagnich, A. Pershin, PL. Rajamalli, D. B. Cordes, A. M. Z. Slawin, D. Beljonne, A. Köhler, I. D. W. Samuel, Y. Olivier, and E. Zysman-Colman, *Adv. Optical Mater.*, 8, 1901627 (2020).
- [37] H. L. Lee, W. J. Chung, and J. Y. Lee, *Small*, 16, 1907569 (2020).

저/자/약/력



성명 이 찬 희

학력 2020년
2020년 ~ 현재

동국대학교 융합에너지신소재공학과 공학사
동국대학교 융합에너지신소재공학전공 석사과정



성명 이 세 연

학력 2010년
2012년
2015년

동국대학교 생명화학공학과 공학사
Kyushu University, 물질창조공학전공 공학석사
Kyushu University, 물질창조공학전공 공학박사

경력 2015년 ~ 2017년
2017년 ~ 현재

삼성전자종합기술원 전문연구원
동국대학교 융합에너지신소재공학과 조교수