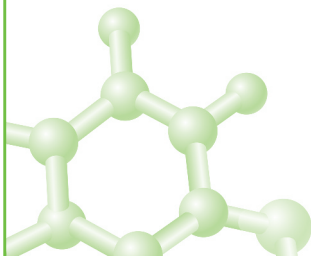




상온 인광 특성 유기 분자의 설계



유영민 | 경희대학교 정보전자신소재공학과, odds2@khu.ac.kr

서론

유기전기발광소자의 양쪽 전극으로부터 주입되는 각 1/2 스핀양자수의 공정(hole)과 전자는 결합을 통해 단일항(singlet) 및 삼중항(triplet)의 엑시톤(exciton)을 형성한다. 이 때 발광 분자 내에 중원자(heavy atom) 등이 제공하는 스핀-오비탈 결합(spin-orbital coupling, SOC)이 없을 경우 단일항 엑시톤만 발광(luminescence)에 참여하고, 삼중항 엑시톤은 열에너지로 소모된다. 따라서 비발광성 삼중항 엑시톤으로부터 발광을 이끌어내는 분자 원리를 구축하는 것이 유기전기발광소자의 효율 증진을 위한 핵심 접근이 된다. 이미 지난 10여년의 연구를 통해 상온 인광성 d^6 -계 전이 금속 착체를 유기전기발광소자의 발광체로 사용하여 기존 형광 발광체 기반 소자보다 획기적으로 증진된 효율을 획득하는 방법이 수립되었다. 뿐만 아니라, 일반적인 스틸벤(stilbene)계 형광체에서도 엑시톤 형성 직전 단계의 공정-전자의 전하 분리종(charge-separated species, 또는 geminate 라디칼 쌍)의 단일항-삼중항 간 에너지 차이 조절을 통해 통계적인 단일항/삼중항 엑시톤 생성비를 극복하여 보다 우수한 전기형광효율을 달성할 수 있음이 보고된 바 있다.^{1,2)} 분자의 단일항-삼중항 간 상호작용 및 전환에 대한 이해는 비단 유기전기발광소자 뿐만 아니라, 광-전자 상호 변환을 필요로 하는 모든 응용 분야

에 필수적으로 요구된다. 일례로 태양광전지에서 수명이 길고, geminate 라디칼 쌍으로의 전하 분리 속도가 낮은 삼중항 엑시톤을 얼마나 많이 형성할 수 있는가가 헤테로 접합(heterojunction)으로의 엑시톤 전달 효율을 늘리기 위한 도전으로 남아 있다. 특히 전자 전이의 스핀 선택 규칙을 준수하는 순수 유기 분자를 이용하여 삼중항 엑시톤을 효율적으로 포집하거나 생성하고, 광발광(photoluminescence)을 구현하려는 목표는 긴 난제로 놓여 있다. 이에 분자의 여기 상태 단일항-삼중항 간 상호작용을 조절하고 나아가 이러한 조절성 원리 획득을 통해 우수한 효율의 전자 → 광 전환, 또는 광 → 전하 전환을 달성하는 연구는 학술적, 산업적으로 중요한 의의를 가진다고 볼 수 있다.

분자의 광 또는 전자 여기 상태의 단일항-삼중항 간 상호작용 및 전환은 전자 준위를 구성하는 오비탈의 특성에 매우 큰 영향을 받는다. 특히 일반적인 $\pi-\pi^*$ 전이 뿐만 아니라, 분자 내 전하 이동(intramolecular charge-transfer, ICT) 전이 및 $n-\pi^*$ 전이가 가능할 경우 이들 전이에 의해 형성되는 전자 준위 내에서 다양한 스핀 작용이 발생할 수 있으며, 각각 고유의 선택 규칙과 동역학적 지배를 받게 된다[그림 1]. 따라서 광물리 거동 이해에 기반한 체계적인 분자 구조 조절은 이들 $\pi-\pi^*$, ICT 및 $n-\pi^*$ 전자 준위의 단일항-삼중항 간 에너지 차이(exchange energy, ΔE_{ex}) 조율 뿐만 아니라, 삼중항 엑시톤으로부터 광발광을 유도하는데 핵심적인 분자 변수를 도출 가능케 한다. 본 총

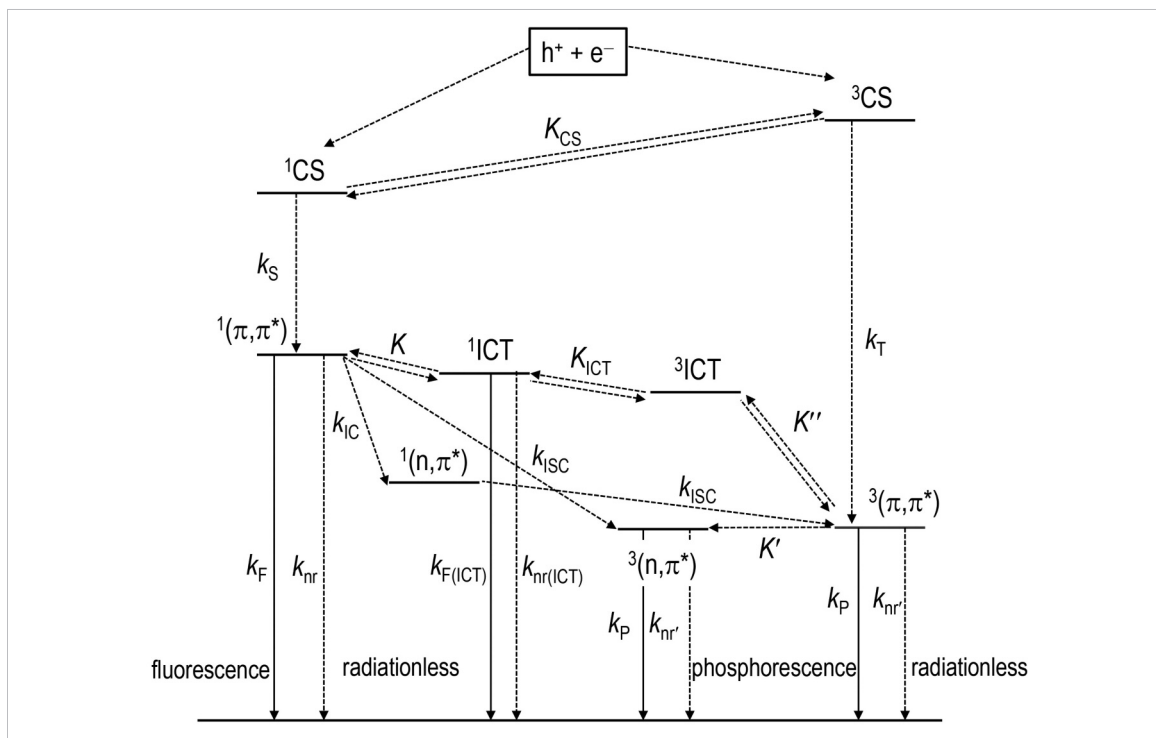


그림 1. 전기 에너지에 의해 여기된 분자의 단일항-삼중항 광물리 거동(CS, charge-separated state; K_{CS} , the equilibrium constant between singlet and triplet charge-separated states; k_S , the rate constant for singlet exciton formation; k_T , the rate constant for triplet exciton formation; K , the equilibrium constant between the singlet $\pi-\pi^*$ state and ICT state; ^1ICT , singlet intramolecular charge-transfer state; K_{ICT} , the equilibrium constant between the singlet and triplet ICT states; ^3ICT , triplet intramolecular charge-transfer state; K'' , the equilibrium constant between the triplet ICT state and triplet $\pi-\pi^*$ states; k_{IC} , the rate constant for internal conversion from the singlet $\pi-\pi^*$ state to singlet $n-\pi^*$ state; k_{ISC} , the rate constant for intersystem crossing between the $\pi-\pi^*$ state and $n-\pi^*$ state; K' , the equilibrium constant between the triplet $\pi-\pi^*$ state and triplet $n-\pi^*$ state; k_F , the rate constant for fluorescence transition from the singlet $\pi-\pi^*$ state; k_{nr} , the rate constant for non-radiative transition from the singlet $\pi-\pi^*$ state; k_{FICT} , the rate constant for fluorescence transition from the singlet ICT state; k_{nrICT} , the rate constant for non-radiative transition from the singlet ICT state; k_P , the rate constant for phosphorescence transition; k'_{nr} , the rate constant for non-radiative transition from the triplet state)

설을 통해 유기 분자 내에서 금속의 도움 없이 여기 상태 단일항-삼중항 간 전환 및 여기 상태 삼중항-바닥 상태 간 전환을 구현한 대표적인 예를 요약하고자 한다. 특히, 상온 인광 특성을 보이는 순수 유기 분자를 중심으로 이 특성을 발현시키고, 나아가 이를 극대화하기 위한 분자 설계 원리들을 논의한다.

태에서 삼중항 상태로의 항간 전이(intersystem crossing, ISC)와 인광 전이를 극대화시켜야 한다. 두 광거동 모두 공히 전자의 스핀 변화를 수반하며, 스핀 선택성을 극복하기 위해 오비탈 배치간 혼합(configurational mixing)을 요구한다. 단분자의 경우 SOC에 의존하게 되는데, 크게 소위 중원자 효과와 ICT, $n-\pi^*$ 전이와 같은 오비탈 중첩을 극소화하는 분자 원리가 적용된다. 중원자 효과의 경우 이미 고리금속화 이리듐, 백금 착체와 같이 중심 금속에 의해 제공되는 SOC가 매우 효과적이며(원자 SOC 상수, $\zeta = 3909 \text{ cm}^{-1}$ (Ir), 4481 cm^{-1} (Pt); c.f., $\zeta < 85 \text{ cm}^{-1}$ (C)). 이를 통해 고효율 상온 인광을 달성할 수 있음이 이미

보로

삼중항 상태에서부터 발광을 얻기 위해서는 단일항 여기상



증명된 바 있다. 이러한 희귀 금속의 도움 없이 큰 SOC를 달성하기 위해서는 전자 전이가 각운동량 변화를 수반해야 하는데, 이 경우 오비탈 중첩도가 작아져 빠른 발광 전이를 확보하기 어렵다. 때문에 일반적인 유기 분자에서 고효율 인광 효율과 SOC를 동시에 달성하는 것은 매우 어려운 난제로 남아 있다. 본문에서는 상온 인광 특성을 가지는 것으로 보고된 유기 분자의 구조를 제시하고, 이의 인광 발현 이유를 논의한다. 나아가 상온 인광 발생을 위한 분자 구조 원리를 정리한다.

전자 전이의 스핀 선택성에 의한 제한에도 불구하고 상온에서 인광을 내는 분자는 간헐적으로 보고되고 있다. 특히 케톤(ketone), 포르밀(formyl)기 등 카르보닐(carbonyl) 유닛을 포함하는 분자의 경우 고체 상태에서 상온 인광을 낼 수 있다고 알려져 있다. 일례로 *p*-cyanobenzaldehyde (1)는 *p*-dichlorobenzene 결정에 도핑되어 $n-\pi^*$ 및 $\pi-\pi^*$ 전위에서 기인하는 인광 거동을 보인다 [그림 2].³⁾ 또한 세 개의 카르보닐기를 가지는 indanetri-one (2)도 프탈산무수물(phthalic anhydride) 매트릭스

나 벤조페논(benzophenone) 결정 내에서 $n-\pi^*$ 특성 인광을 보인다고 보고되었다.⁴⁾

카르보닐기의 $n-\pi^*$ 전이에 의한 SOC 효과를 극대화시키기 위한 한 방법으로 결정 상태의 분자 간 전자적 유도 작용을 이용할 수 있다. 미시건 대학의 김진상 교수 그룹은 분자 간 할로젠 결합을 조절하여 상온 인광 거동을 확보할 수 있는 분자군을 발표하였다. 브롬기와 포르밀기를 동시에 포함하는 벤젠 및 나프탈렌 유도체 (3-6)는 고체 상태에서 매우 짧은 2.86 Å의 브롬 원자와 인접한 다른 분자의 포르밀기에 있는 산소 원자 간 거리를 가진다. 이러한 공간적 위치에서 산소 원자의 비공유 전자쌍은 맞은편 분자의 브롬기에 약하게 비편재화되어, 포르밀기의 $n-\pi^*$ 전이에 브롬에 의한 중원자 효과의 SOC 거동을 더할 수 있게 한다. 나아가 브롬과 포르밀기 간 강한 결합력은 분자의 내부 운동을 약화시켜 비발광성 전이 속도를 늦춰준다. 이러한 효과들이 더하여 결정 상태에서 매우 높은 (양자효율 = 55%) 녹색 인광을 낼 수 있다.⁵⁾ 이와 유사하게 분자 간 수소 결합 및 할로젠 결합에 의해 결정 상태 상온 인광이 얻

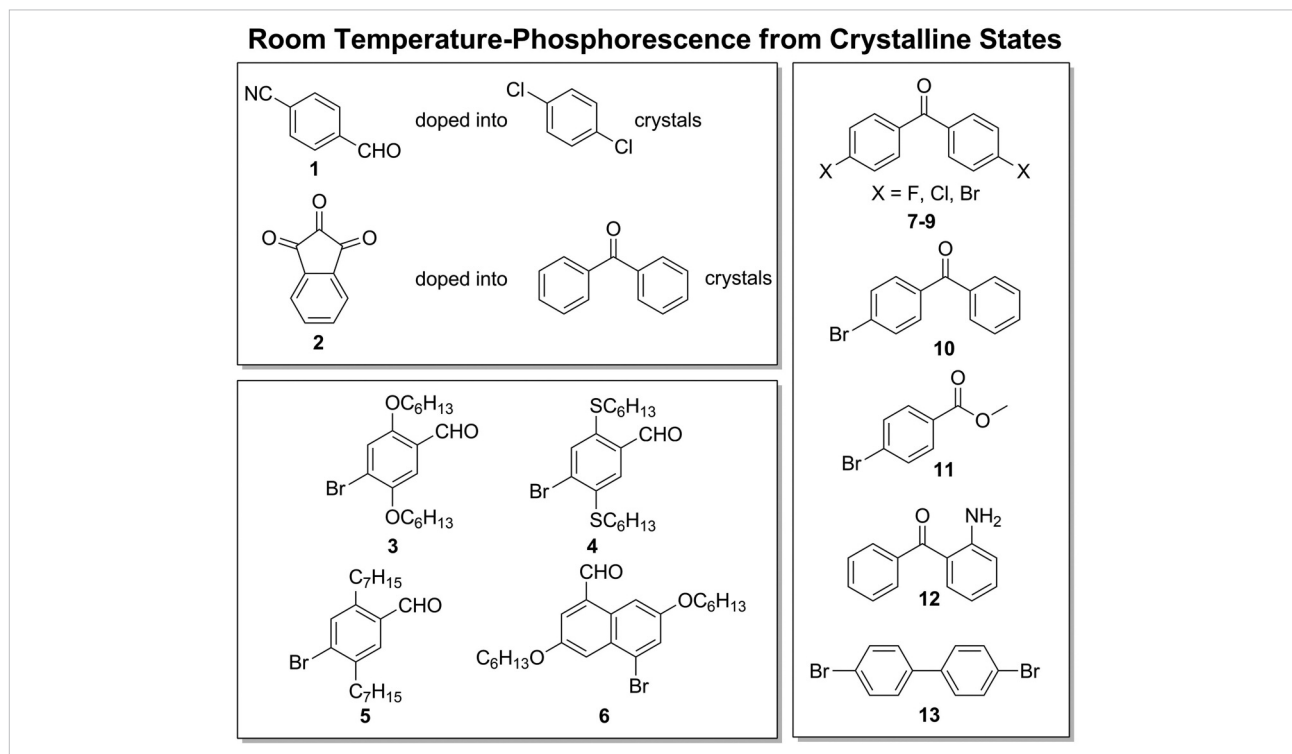


그림 2. 결정 상태 상온 인광 특성 유기 분자

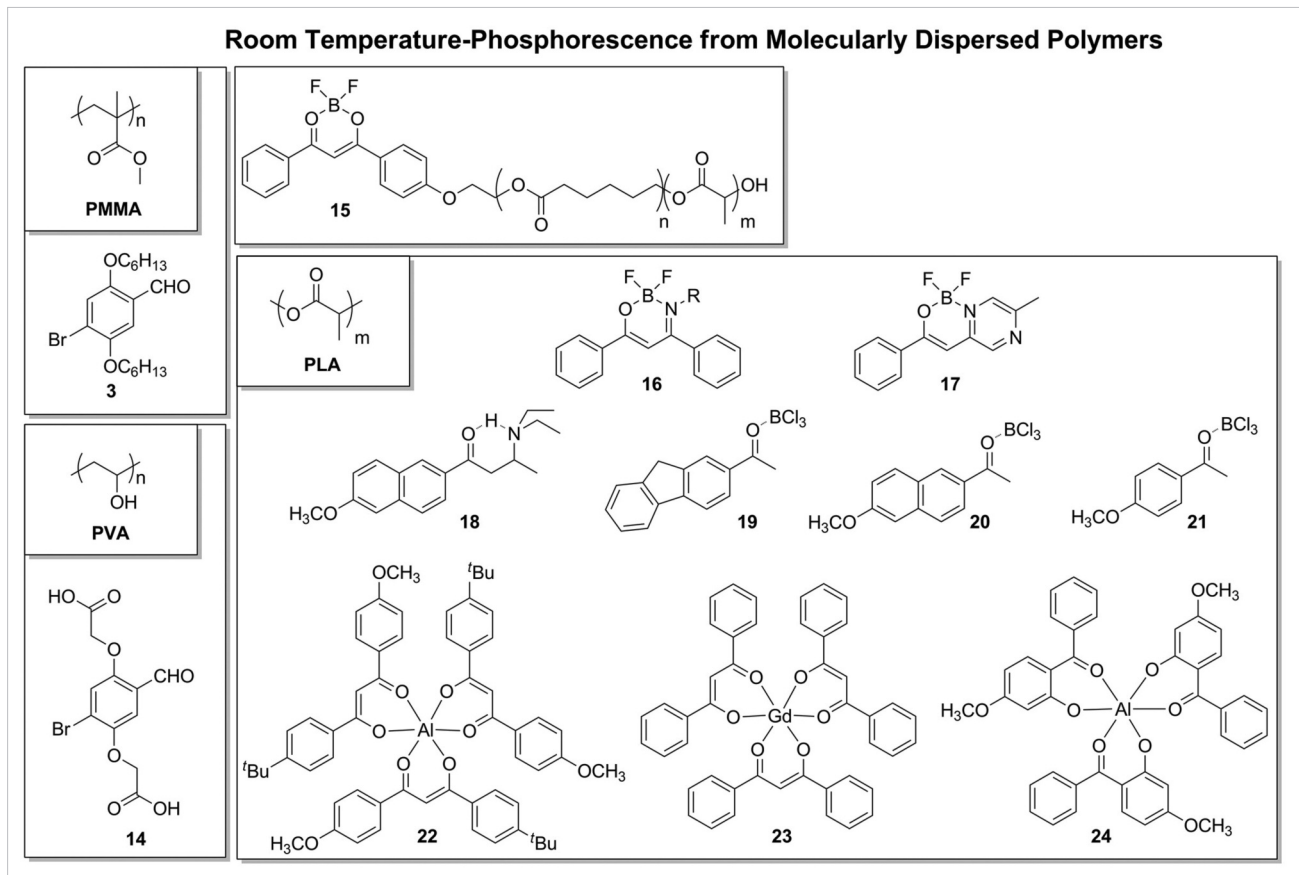


그림 3. 고분자에 도핑된 상태 상온 인광 특성 유기 분자

어지는 다른 예도 설명될 수 있다. Tang 교수 그룹은 F, Cl, Br, NH_2 등 수소 결합 또는 할로젠 결합이 가능한 벤조페논 및 바이페닐(biphenyl) 유도체들(7-13)의 발광 특성을 조사하였다.⁶⁾ 이들 분자는 용액 및 poly(methyl methacrylate) (PMMA)에 도핑된 상태에서 발광 특성을 보이지 않으나, 결정 상태에서 강한 상온 인광을 보인다. 이는 상기 치환체들이 제공하는 $\text{CH}\cdots\text{O}$, $\text{NH}\cdots\text{O}$, $\text{CH}\cdots\text{X}$ ($\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$)의 수소 결합과 $\text{CBr}\cdots\text{BrC}$ 의 할로젠 결합에 의해 비발광성 전이가 효과적으로 억제되었기 때문으로 설명된다.

위의 예들은 브롬과 포르밀기가 동시에 도입된 방향족 화합물의 고체 상태 상온 인광이 결정 상태에 존재하는 분자 간 결합에 크게 의존한다는 것을 시사한다. 그러나 다양한 분야에 적용하기 위해서는 비결정성 상태에서도 상온 인광 특성을 확보하는 것이 필요하다. PMMA는 주쇄에 연

결된 에스테르(ester) 유닛의 입체 규칙성(tacticity)에 따라 상이한 β 이완(β relaxation) 거동을 보인다. 순수 유기 분자의 상온 인광 효율은 긴 여기 수명의 삼중항 상태에 존재하는 비발광성 전이에 크게 좌우되기 때문에, 고분자 매트릭스의 이완 거동 조절은 상온 인광 효율 증진에 매우 효과적인 방안을 제공한다. 실제 동일 배열(isotactic) PMMA에서는 β 이완 거동이 더 활발한 교대 배열(syndiotactic), 혼성 배열(atactic) PMMA보다 더 강한 상온 인광을 얻을 수 있다[그림 3].⁷⁾ 이와 유사하게, 수소 결합을 통해 고분자 내 상온 인광성 분자의 비발광성 전이를 억제할 수 있다. Poly(vinyl alcohol)(PVA)는 히드록시기 간 수소결합에 의해 고분자의 구조적 경직성을 높인다. 상온 인광성 화합물에 카르복시기 등 수소결합이 가능한 기능단을 연결하여 이 PVA와 강한 상호 인력을 유도하게 되면 인광성 화합물의 분자 내 운동을 효과적으로 억제할 수 있다

[그림 3의 14]. 이를 통해 할로젠 원소를 경유하는 분자 간 상호 작용에 의한 SOC를 유지함과 동시에 여기 상태 비발광성 전이 속도를 저하시킴으로써 상온 인광 강도가 증진된다. 실제 PVA에서 PMMA 대비 더 우수한 인광 효율이 측정되었다(양자효율(PVA)/양자효율(PMMA) = 1.5).⁸⁾

상기 결과는 비발광성 전이의 효과적 억제에 상온 인광 확보에 필수적임을 보여준다. 이미 이전 연구에서 동종 분자 간 할로젠 결합과 같은 상호 작용 없이, 사이클로덱스트린(cyclodextrin, CD)과 내포 초분자체(inclusion complex)를 형성하여 35%의 상온 인광을 기록한 예가 보고된 바 있다.⁹⁾ 1-브로모나프탈렌(1-bromonaphthalene)과 알코올을 CD를 포함하는 수용액에 넣으면 이 세 화합물이 삼중 초분자체를 형성한다. 이 경우 알코올은 1-브로모나프탈렌과 CD 간 결합을 증진시켜주는 효과를 인가한다. 1-브로모나프탈렌은 CD 내 결합된 상태에서 500–650 nm의 상온 인광을 낸다. 특이할 점은 알코올의 구조에 따라 인광 강도에 큰 차이를 보이는 점인데, 이는 상온 인광체의 비발광성 전이와 산소에 의한 소광을 막아주는 정도가 다르기 때문으로 설명된다.

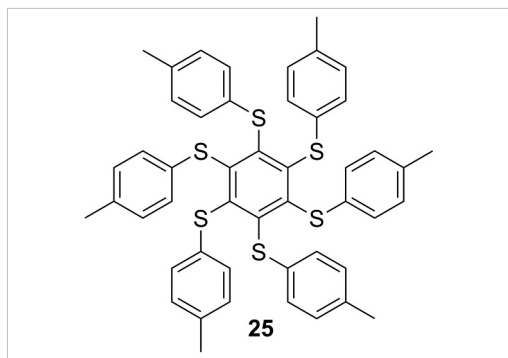


그림 4. 고효율 상온 인광 특성 유기 분자

결국 고체 상태에서 상온 인광이 주로 얻어지는 이유는 분자 내 운동을 매개로 하는 비발광성 전이가 억제되기 때문이라 볼 수 있다. 분말, 결정 상태 등 여러 고체 상태에서 상온 인광을 보이는 예는 많이 보고되고 있다. 특히, 분자 내 결합의 회전(bond rotation)에 의해서만 도달되는 비발광성 삼중항 상태를 포함하는 분자에서 고체 상태 상온 인광 특성이 나타날 수 있다. [그림 4]의 벤젠 분자 (25)는

6개의 tolylsulfide 기를 가진다. 여기서 tolylsulfide 간 공간적 상호 배치에 따라 여러 이형태체(conformer)가 존재하는데, CH- π 인력에 의해 가장 안정한 두 이형태체는 한 쌍의 tolylsulfide 간 상호 위치가 다르며, 각각 ICT 특성을 가지는 T_2 상태와 $\pi-\pi^*$ 전이 특성을 가지는 T_1 상태를 가진다. CAM-B3LYP 계산에 의해 예측된 포텐셜 에너지 표면 결과에 따르면, T_1 상태는 바닥 상태와 교차한다. 따라서 tolylsulfide의 회전을 억제하여 T_1 이형태체로의 접근을 억제하면 상온 인광을 얻을 확률이 높아진다. 이 분자는 분말의 고체 상태에서 양자효율 80%와 513 nm의 강한 상온 인광을 보인다.¹⁰⁾

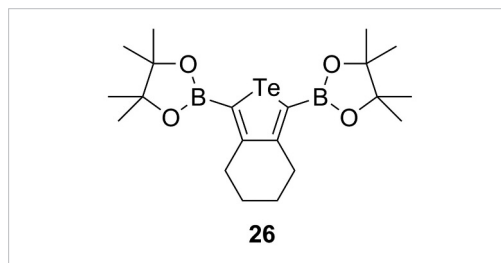


그림 5. Te를 포함하는 상온 인광 특성 유기 분자

주족 원소(main group element)를 포함하는 π 공액 구조는 높은 SOC 효과를 얻을 수 있어 상온 인광 특성을 낼 수 있을 것이라 예측된다. Te^{II} 의 텔루로펜(tellurophene)에 추가적으로 pinacolboronate(Bpin)이 도입된 화합물[그림 5의 26]은 용액에서 발광 특성을 보이지 않으나, 필름 등 고체 상태에서 강한 상온 인광을 낸다(양자효율 ~ 12%, $\lambda = 535$ nm).¹¹⁾ 이 인광 거동은 Te^{II} 에 의한 SOC 효과와 더불어, Te^{II} 의 비공유전자쌍과 Bpin의 비어있는 p 오비탈 간 ICT에 의한 것으로 추정된다. 이와 더불어 입체 장애 효과가 큰 Bpin기가 고체 상태에서 Te-Te 간 거리를 5 Å 이상 유지해주어 유해한 분자 간 인광 소광을 효과적으로 억제하는 영향도 있다.

순수 유기 분자는 작은 SOC 효과 뿐만 아니라, 일반적으로 낮은 삼중항 준위를 가지기 때문에 아인슈타인 밴드갭 법칙에 의거 매우 낮은 발광 효율을 낸다. 그러나 예외적으로 Kasha 법칙으로부터 벗어나서 상위 삼중항(T_n) 상태에서 인광을 낼 수 있음이 보고되고 있다. Lupton과 Höger

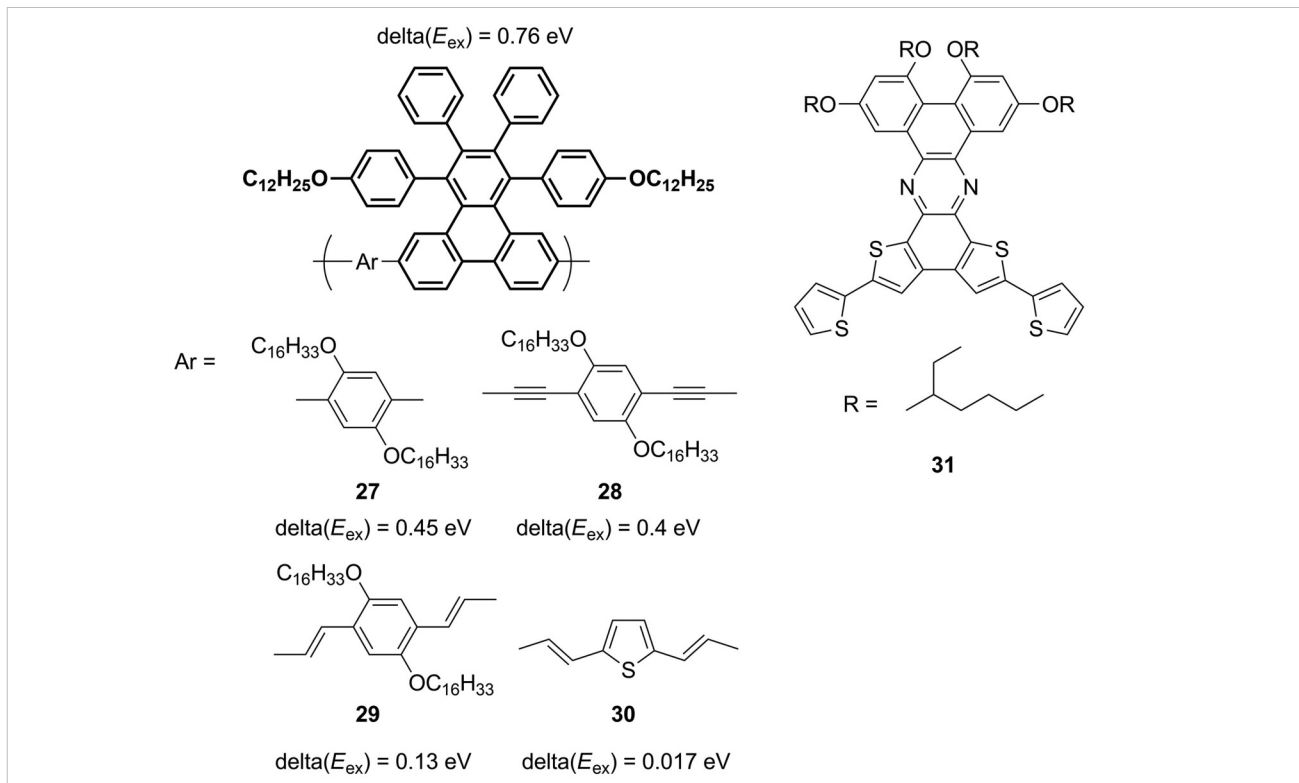


그림 6. 2D π 공액을 가지면서 상온 인광 특성을 보이는 고분자 및 유기 분자

그들은 트리페닐렌(triphenylene) 구조를 포함하는 π 공액 고분자 (27-30)를 합성하고 형광과 인광 스펙트럼을 관측하여 고분자의 광학 ΔE_{ex} 를 결정하였다.¹²⁾ 이 공중합체에서는 π 공액 구조의 변화에 상응하여 형광을 내는 단일항 에너지는 변화하지만, 인광성 삼중항은 트리페닐렌에 국지화되는 특성이 있다. 따라서 [그림 6]에 나타난 바와 같이 π 공액 고분자의 주쇄 구조 조절을 통해 밴드갭 에너지를 낮춤에 따라 형광 특성 단일항과 인광 특성 삼중항 사이의 ΔE_{ex} 를 0에 수렴시킬 수 있다. 이러한 특성은 π 공액 고분자의 주쇄에 기인하는 삼중항 상태와 트리페닐렌의 삼중항 상태 간 내부 전환(internal conversion)이 매우 느리기 때문에 나타나는 것으로 이해된다. 따라서 발광성 경로를 통해 삼중항 엑시톤을 포집할 수 있고, 이 엑시톤은 단일항 엑시톤이 내는 발광 파장과 유사한 영역에서 인광을 내게 된다. Lupton과 Höger 그룹은 트리페닐렌 뿐만 아니라, 페나진(phenazine)과 같은 2D 구조의 아릴 분자

에서도 인광성 삼중항 준위를 편재화시킬 수 있음을 보고하였다.¹³⁾ [그림 6]의 페나진 공액 분자 (31)의 상온 전기발광스펙트럼에서는 형광($\lambda = 630$ nm)과 더불어 페나진의 삼중항에서 기인하는 상온 인광($\lambda = 760$ nm)이 동시에 관측된다. 이러한 희귀한 이중 발광 거동은 전기적으로 형성된 엑시톤의 고효율 광전환에 유리하게 사용될 것이다.

긴 π 공액 구조의 도움 없이 용액 상태에서 상온 인광을 내는 분자군들이 최근 발표되고 있다. 강한 청색 형광체로 잘 알려진 플루오렌(fluorene)의 2번 위치에 브롬기, 7번 위치에 포르밀기를 도입하면 [그림 7의 32] 클로로포름 용액에서 (400 μ M) 358 nm의 청색 형광 이외에 500 nm의 강한 녹색 인광이 얻어진다(양자효율 = 35%).¹⁴⁾ 인광 발광 수명은 355 μ s로 매우 길며, PMMA에 도핑되어 있을 때도 강한 인광 강도를 유지한다. 상온 인광의 발현 원인으로 브롬기의 중원자 효과와 더불어, 포르밀기의 $n-\pi^*$ 전이에 의한 기여가 추정되고 있다. 밀도함수이론법에 기반한 계

산화학적 예측을 통해 $n-\pi^*$ 전이 특성이 강한 단일항 여기 상태에서 $\pi-\pi^*$ 전이 특성의 삼중항 상태로 향간 전이가 일어나고, 이곳에서 상온 인광이 얻어지는 메커니즘이 제시되어 있으나, 정밀한 광동역학적 규명 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다. 유사한 원리로 4번 위치에 브롬기가 도입된 1,8-naphthylimide 유도체들도(33-35) 톨루엔 용액 내에서 ~ 570 nm의 상온 인광(양자효율 $\sim 0.1\%$)을 내는 현상이 설명된다.¹⁵⁾

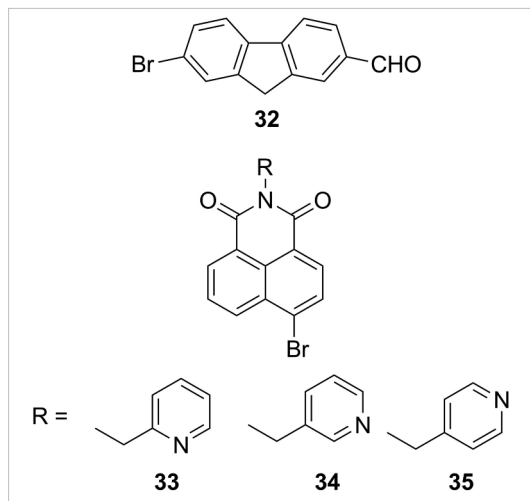


그림 7. 용액 상태 상온 인광 특성을 보이는 유기 분자

최근 단일항 분열(singlet fission)에 의해 순수 유기 분자로부터 고효율 상온 인광을 구현할 수 있음이 보고되었다.¹⁶⁾ 단일항 분열은 단일항 여기 상태 분자와 바닥 상태 분자 간 반응에 의해 2개의 삼중항 여기 상태 분자가 형성되는 것으로(i.e., $S_1 + S_0 \rightarrow 2 T_1$), 하나의 광자 또는 엑시톤으로부터 두 개의 여기 상태를 형성시킬 수 있기 때문에 200%의 내부양자효율을 달성할 수 있다. Venkatesan 그룹은 히드록시비닐이민(hydroxyvinylimine)의 보론 착체가 높은 농도의 용액, 결정 및 고분자에 도핑된 상태에서 고효율(양자효율 $> 100\%$)의 상온 인광을 낼 수 있다는 것을 발견하고 이를 단일항 분열로 설명하였다(그림 8). 이러한 단일항 분열은 보론 착체의 동종간 강한 상호 결합력과 더불어 $E(S_1) > 2 \times E(T_1)$ 의 에너지 조건을 만족할 때 발생할 수 있다. 단일항 분열로부터 획득한 삼중항으로부터 상온 인광을 얻기 위해서는 비발광 경로를 최소화하는 분자 디자인과 매트릭스의 선택도 중요하다.

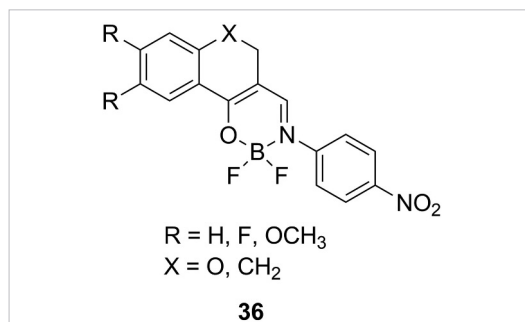


그림 8. 단일항 분열에 의해 상온 인광 특성을 보이는 유기 분자

단일항 분열은 분자 간 오비탈 중첩을 요구하기 때문에 분자 간 상호 인접 정도에 민감하다. 따라서 샘플의 상태에 따라 단일항 분열 효율이 좌우되며 여기 상태 분자 내 형광 전이와 경쟁 관계에 놓이게 된다. 실제로 poly(L-lactide) (PLA)의 말단에 도입된 보론 β -다이벤조일메테인(dibenzoylmethane) 화합물[그림 3의 15]의 형광-인광의 이중 발광 거동은 단일항 여기 상태 분자의 불완전한 단일항 분열에 기인하는 것으로 이해될 수 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 그러나, 고분자의 결정성과 상온 인광 강도가 반비례한다는 관측 결과는 단일항 분열 이외의 광거동이 관여될 수 있음을 추정하게 한다.²⁰⁾ 일례로, 보론 뿐만 아니라, 알루미늄, 가돌리늄과 같은 루이스 산을 아릴 화합물의 케톤에 배위 결합시킬 경우 공통적으로 PLA에 저농도로 도핑된 상태에서도 강한 상온 인광이 관측된다. Jiang과 Zhang 그룹에 의한 최근 비교 연구에 따르면 monoketone이나 Mannich 염기, iminoketone과 같은 이배위 분자[그림 3의 16-24]를 루이스 산에 배위 결합시키게 되면 분자 내 전하 이동 전이가 발달하여 인광성 $\pi-\pi^*$ 전위로의 향간 전이가 발생할 수 있다고 한다.²¹⁾ 단일항 분열 현상을 보이는 분자를 이용하여 고효율 전기발광에 응용한 예는 아직 발견되지 않고 있다. 그러나 삼중항으로부터 상온 인광 뿐만 아니라 지연 형광도 도출할 수 있기 때문에 향후 분자 구조 조절을 통해 고효율 전기발광소자로의 적용이 기대된다.

요약 및 전망

희귀 금속에 의존하지 않으면서 전기적으로 생성된 단일

항 및 삼중항 엑시톤을 모두 발광으로 끌어내는 방편으로 상온 인광 특성 유기 분자를 발광 물질로 이용하는 접근이 제시될 수 있다. 순수 유기 분자로부터 상온 인광을 얻는 것은 전자 전이의 스핀 보존 법칙을 위배하는 것으로 이를 위해 분자 구조의 세심한 조절과 광물리 거동 디자인이 요구된다. 본 총설에서는 상온 인광을 보이는 대표적인 유기 분자의 구조와 상온 인광 발현의 원인으로 제안되는 메커니즘을 요약하였다. 고효율 상온 인광을 확보하기 위해서는 SOC 효과를 극대화하여야 한다. 이를 위해 1) 할로젠과 카르보닐기를 포함하는 분자 구조, 2) 이 분자들의 고체 상태 분자 간 할로젠-카르보닐기 결합 유도, 3) Te^{II} 와 같은

주족 원소의 이용, 4) 보론 등을 이용한 분자 내 ICT 특성 부여 및 5) $2D\pi$ 공액 구조 포함 등의 분자 설계를 이용할 수 있다. 이와 더불어, 비발광성 전이를 억제하기 위해 6) 고체 상태 할로젠-할로젠 결합 유도와 7) 고분자 등 매트릭스 내 혹은 매트릭스와 발광체 간 구조적 경직성(rigidity) 증대를 위한 방안이 요구된다. 또한 고농도에서 상온 인광을 얻기 위해 단일항 분열이 가능하도록 분자 간 오비탈 중첩도를 높일 수 있는 디자인을 고려할 수 있다. 그러나 단일항 분열이 가능한 최적의 분자 간 공간적 위치 및 오비탈 배열에 대한 조절성 원리가 수립되지 않은 만큼, 추가적인 연구가 뒷받침되어야 한다. 

참고문헌

1. Segal, M.; Singh, M.; Rivoire, K.; Difley, S.; Van Voorhis, T.; Baldo, M.A. *Nat. Mater.* **2007**, *6*, 374-378.
2. Difley, S.; Belhonne, D.; Van Voorhis, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 3420-3427.
3. Itoh, T. *J. Lumin.* **2004**, *109*, 221-225.
4. Roy, J.; Bhattacharya, S.; Mondal, S.; Ghosh, S. *Spectrochim. Acta A* **1997**, *53*, 225-231.
5. Bolton, O.; Lee, K.; Kim, H.-J.; Lin, K. Y. Kim, J. *Nat. Mater.* **2011**, *3*, 205-210.
6. Yuan, W. Z.; Shen, X. Y.; Zhao, H.; Lam, J. W. Y.; Tang, L.; Lu, P.; Wang, C.; Liu, Y.; Wang, Z.; Zheng, Q.; Sun, J. Z.; Ma, Y.; Tang, B. Z. *J. Phys. Chem. C* **2010**, *114*, 6090-6099.
7. Lee, D.; Bolton, O.; Kim, B. C.; Youk, J. H.; Takayama, S.; Kim, J. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 6315-6329.
8. Kwon, M. S.; Lee, D.; Seo, S.; Jung, J.; Kim, J. *Angew. Chem., Int. Ed.* DOI: 10.1002/anie.201404490.
9. Ponce, A.; Wong, P. A.; Way, J. J.; Nocera, D. G. *J. Phys. Chem.* **1993**, *97*, 11137-11142.
10. Bergamini, G.; Ferri, A.; Botta, C.; Giovanella, U.; Di Motta, S.; Negri, F.; Peresutti, R.; Gingras, M.; Ceroni, P. *J. Mater. Chem. C* **2013**, *1*, 2717-2724.
11. He, G.; Delgado, W. T.; Schatz, D. J.; Merten, C.; Mohammadpour, A.; Mayr, L.; Ferguson, M. J.; McDonald, R.; Brown, A.; Shankar, K.; Rivard, E. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2014**, *53*, 4587-4591.
12. Chaudhuri, D.; Wettach, H.; van Shooten, K. J.; Liu, S.; Sigmund, E.; Höger, S.; Lupton, J. M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2010**, *49*, 7714-7717.
13. Chaudhuri, D.; Sigmund, E.; Meyer, A.; Röck, L.; Klemm, P.; Lautenschlager, S.; Schmid, A.; Yost, S. R.; Van Voorhis, T.; Bange, S.; Höger, S.; Lupton, J. M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 13449-13452.
14. Xu, J.; Takai, A.; Kobayashi, Y.; Takeuchi, M. *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 8447-8449.
15. Ventura, B.; Bertocco, A.; Braga, D.; Catalano, L.; d'Agostino, S.; Grepioni, F.; Taddei, P. *Inorg. Chem.* **2014**, *118*, 18646-18658.
16. Koch, M.; Perumal, K.; Blacque, O.; Garg, J. A.; Saiganesh, R.; Kabilan, S.; Balasubramanian, K. K.; Venkatesan, K. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2014**, *53*, 6378-6382.
17. Zhang, G.; Chen, J.; Payne, S. J.; Kooi, S. E.; Demas, J. N.; Fraser, C. L. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 8942-8943.
18. Zhang, G.; Kooi, S. E.; Demas, J. N.; Fraser, C. L. *Adv. Mater.* **2008**, *20*, 2099-2104.
19. Zhang, G.; Palmer, G. M.; Dewhurst, M. W.; Fraser, C. L. *Nat. Mater.* **2009**, *8*, 747-751.
20. Zhang, G.; Fiore, G. L.; St. Clair, T. L.; Fraser, C. L. *Macromolecules* **2009**, *42*, 3162-3169.
21. Zhang, X.; Xie, T.; Cui, M.; Yang, L.; Sun, X.; Jiang, J.; Zhang, G. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2014**, *6*, 2279-2284.

유영민 Youngmin You



- 서울대학교 응용화학부, 학사 (1997-2001)
- 서울대학교 응용화학부, 석사 (2001-2003, 지도교수: 김영규)
- 서울대학교 재료공학부, 박사 (2003-2007, 지도교수: 박수영)
- 서울대학교 재료공학부, 박사후연구원 (2007-2008)
- Massachusetts Institute of Technology 화학과, Postdoctoral Fellow (2009-2010, 지도교수: Stephen J. Lippard)
- 이화여자대학교 바이오융합과학과, 연구교수 (2010-2012)
- 한국과학기술연구원, 선임연구원 (2012-2013)
- 경희대학교 정보전자신소재공학과, 조교수 (2013-현재)