

## 전기화학발광소자의 기술현황 및 과제

성열문 <경성대학교 전기공학과 교수>

### 1. 전기화학발광 (Electrochemiluminescence; ECL)

국내의 발광소자 분야는 2000년경 발광 다이오드 (Light Emitting Diode; LED) 기술의 상용화가 본격적으로 검토되면서 최근 산업적으로 급성장을 이룩하고 있다. 표시소자에서 조명산업에 이르는 거대 시장을 형성하게 될 발광소자 기술은 현재 가장 큰 이슈로 부각되었고, 차세대 발광재료와 소자구현에 대한 기술개발 연구는 원천기술 선점과 고부가 가치 실현의 측면에서 많은 연구자들로부터 큰 주목을 받고 있다[1]. 국내에서의 발광소자 연구는 주로 유/무기 전계발광(Electroluminescence; EL) 기술, 특히 유기 EL (OLED)에 주목하여 고효율의 면 발광 소자에 대한 연구가 산·학·연 차원에서 활발히 진행되고 있다[2]. 현재의 LED 기술은 반도체 공정기술을 기반으로 하고 있어서 대기업 주도의 상업화가 진행되고 있으며, 가격 또한 비싼 편이다. 이에 비해 OLED 소자는 스크린 프린팅, 닥터 브레드법과 같은 후막공정에 의해 제조가 가능하여, 초기 설비투자 면에서 큰 부담이 없어 중소기업들로부터도 많은 관심을 받고 있고, 구조가 단순하고 소비전력이 낮은 점들이 기대되고 있다. 한편 OLED에 관한 활발한 연구와 제품화가 진행 중임에도 불구하고 여전히 개선해야 할 점들이 지적되고 있다. 여기에는 여러 가지 이유

가 있겠지만 우선 대부분 직류구동 방식에 의존하므로 한쪽 전극에의 불순물 축적 등으로 인한 장기 안정성(Long-term Stability)이 가장 큰 문제이고, 그 외에도 다층복합형 고분자 구조 내에서의 전하 이동도 개선과 새로운 발광소재의 개발과 등이 해결해야 할 당면과제로서 지적되고 있다[3-4]. 특히 발광재료의 경우 형광재료와 인광재료가 있는데, 형광은 발광재료의 여기 일중항(singlet)만을 이용하므로 발광효율이 낮지만, 여기 일중항과 삼중항(triplet)을 모두 이용할 수 있는 인광의 경우에는 높은 효율을 기대할 수 있다. 이처럼 인광물질을 발광 도펀트(dopant)로 사용하면 고효율을 얻을 수가 있는데, 이러한 관점에서 금속착체 구조의 발광재료에 대한 연구가 많은 주목을 받고 있다. 예를 들어 착체의 중심금속으로 루테튬(Ru)을 사용한 Ru착체에서는 중심금속(Ru) 이온의 d궤도와 배위자의  $\pi$ 전자계를 포함한 복잡한 전이상태(Metal-Ligand Charge Transfer; MLCT)가 형성되고, 계간 전이가 원활해져 삼중항 활용이 가능하여 높은 양자효율의 인광을 낼 수 있다. 이러한 원리를 구체화한 대표적 예가 전기화학발광(Electrochemical Luminescence; ECL) 소자이다[5-6]. ECL 소자는 EL과 CL의 특징을 조합한 발광소자로서, 그림 1에 나타난 바와 같이 최근의 개선된 ECL 셀의 구조는 염료 태양전지 [7-8]와 매우 유사한 구조이며, 반투명애다 제작공

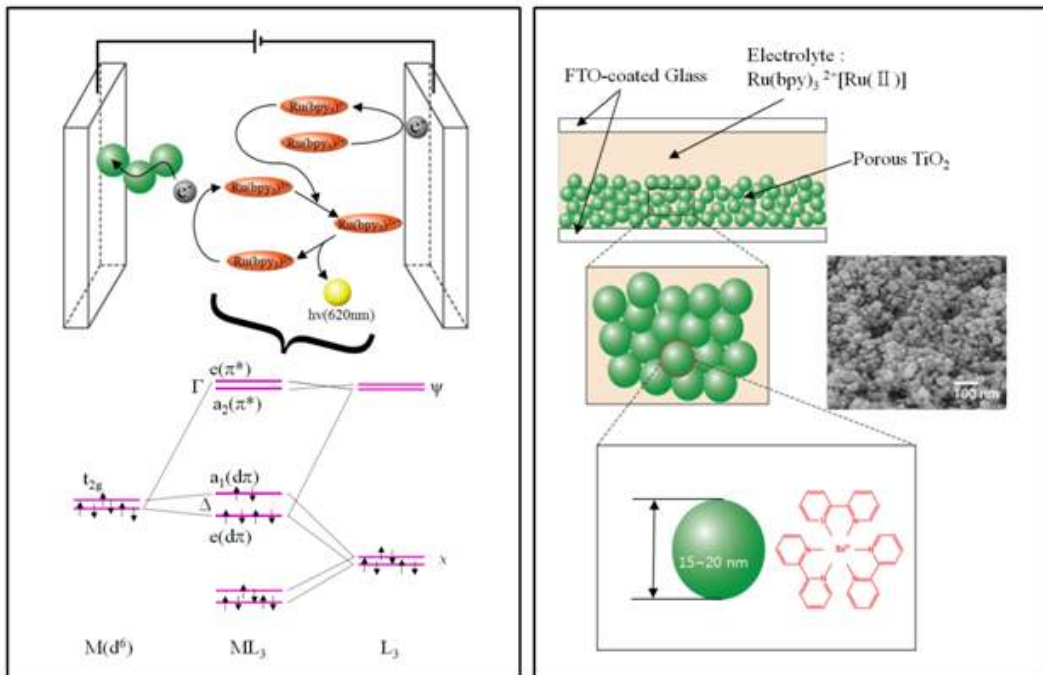


그림 1. 나노입자 전극기반의 ECL의 동작원리 및 셀 구조

정 또한 간단하다는 이점이 있다. 그리고 금속착물 구조의 발광재료를 사용한다. ECL은 두께가 수  $\mu\text{m}$ 의 액체 및 준 고체 형이고, 수 V의 저전압 구동으로 발광한다. 게다가 직류와 교류 양방의 구동이 가능하여 유기 EL에서 지적되고 있는 직류구동에 의한 수명단축 문제를 극복할 수 있을 것으로 기대된다. ECL 연구는 미국, 일본 등지에서 진행되고 있으나, 국내에서는 현재까지 파악된 바로는 본 연구실의 연구 성과가 처음이다[9]. 발광재료로서  $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 을 사용한 그림 1의 구조에서 전극 양단에 전압(약 3V)을 인가하면, Ru계 전해질 내의 Ru(II) 이온이 TiO<sub>2</sub>의 음극 근방에서 Ru(I)으로 환원되고, 어노드에서는 Ru(III)로 산화된다. 이들 Ru(I) 및 Ru(III) 이온들이 재결합하는 과정에서 발광이 일어난다. 발광 셀의 효율은 전극근방에서의 Ru(II)의 산화-환원 작용과 Ru(I)와 Ru(III) 간의 재결합 과정에 크게 영향을 받는다. 현재  $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 을 사용한 적색 계열의 발

광재료 기술은 확보되어 있으나, 녹색과 청색에 대해서는 아직도 적당한 색순도와 고효율을 가진 재료에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다. 향후 상용화 수준에 도달하기 위해서는 효율(efficiency)과 장기 안정성(Long-term Stability), 그리고 높은 색순도의 RGB 발광 구현 등이 당면과제이다.

## 2. ECL의 연구 현황

ECL 기술에 대한 국내의 연구현황을 살펴보자. 먼저 원천기술 보유국인 미국의 경우. 대표적인 연구자로서 Texas at Austin 대학의 Bard 교수와 Faulkner 교수를 들 수 있는데, 발광재료로써 방향족탄화수소를 비롯하여, Ru착체 및 Porphyrin계 유기화합물 등을 사용한 직류구동 방식 ECL 소자를 개발하고, 연속발광 및 반응 기구에 대한 이론적 해석을 수립하는 등, 그동안 많은 연구 성과를 발표해 왔다

[5-6, 10-11]. 그리고 MIT 공대의 Rubner 교수팀이 ECL용 발광재료인 Ru착체[Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>]를 개발하여 원천기술을 보유하고 있고, 최근 고체형 ECL 소자 개발에 주력하고 있다. Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>와 폴리머 매트릭스(PMMA)를 혼합한 발광층을 Spin-coat법으로 제작하여 외부 양자효율을 대폭 향상시킨 (Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup> 단독 : 1%, Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup> + 25% PMMA : ~3%) 고 휘도(~2,000cd/m<sup>2</sup>) 고체형 ECL 소자를 발표하고 있다[12-14]. Missouri 주립대학의 Richter 교수팀에서는 ECL용 유/무기 발광 시스템에 대한 Review를 비롯하여 ECL 발광재료의 설계와 응용에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다[15-18].

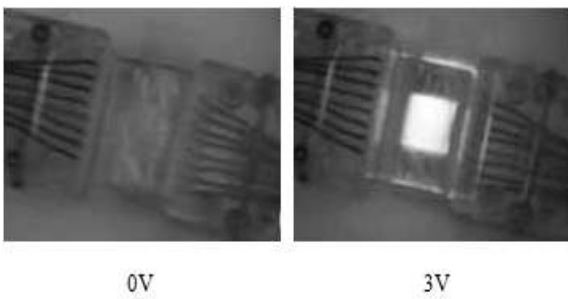


그림 2. 고분자 PBDOHF를 이용한 ECL 소자 (일본 Toshiba 연구소, 2008)

일본에서는 Sanyo연구소의 Nishimura 팀이 Ir 착체[Ir(ppy)<sub>3</sub>]와 Anthracene계열의 화합물(DPA)을 발광재료로써 각각 도입하여 청색계열 ECL 소자 연구를 발표하였으며[19-20], Toshiba 연구소의 Mizuno 연구팀은 황색계열 저분자 발광소재인 Rubrene과 청색계열 고분자 소재인 Polyfluorine 화합물(PBDOHF)을 각각 사용한 ECL 소자에서, 교류전압 인가에 따른 발광 응답속도를 비교한 결과, 고분자인 PBDOHF를 사용한 경우가 빠른 응답속도를 얻었음을 보고하였다(그림 2 참조). 그 외에도 Kyushu 공대의 Hayase 교수팀을 비롯하여, Hsueh, Knight, Zhang, Oyama, 등에 의해 유/무기 발광시스템에 대한 다양한 연구 성과가 보고되고 있다.

한편 국내에서는 경성대학교 연구실과 한국에너지기술연구원 등의 일부 연구자를 중심으로 이제 막 시작한 단계에 들어간 새로운 연구 분야이며, 앞으로 많은 신진 연구 인력의 참여가 요구된다. 2010년도에 경성대 연구실에서 나노 다공질 TiO<sub>2</sub> 등의 나노입자 전극기술을 바탕으로 국내에서는 처음으로 TiO<sub>2</sub> 나노입자 전극과 발광재료인 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>를 사용한 적색발광(피크파장: 620 nm) ECL 기술을 발표한 이래(그림 3 참조). 최근 들어 한국에너지기술연구원에

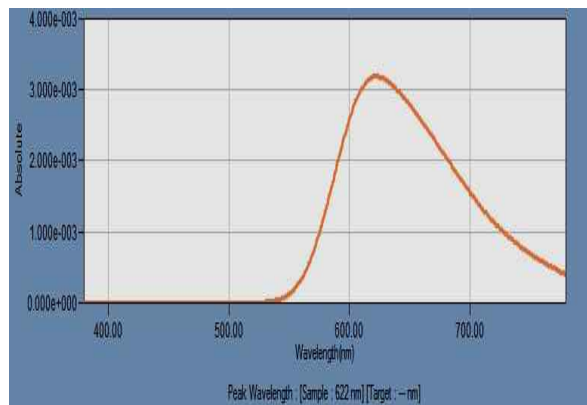
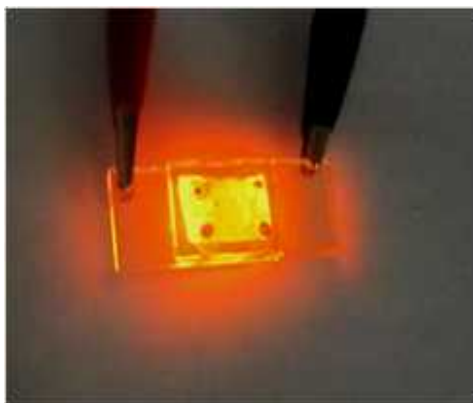


그림 3. 경성대 연구실에서 구현한 ECL 셀의 발광모습(좌)과 측정된 발광휘도분포(우)

서 Anthracene을 소재로 한 셀로부터 청색발광 (Blue-ECL)의 가능성을 확인하는 단계까지 진척되었다. 하지만 효율개선과 안정된 발광을 구현하기 위해서는 좀 더 연구가 필요한 상황이다.

한편 지금까지의 연구는 주로 유/무기 발광재료를 중심으로 한 물질개발에 집중되어 왔으나, 구조 개선의 측면에서 심화연구의 필요성 또한 대두되고 있다. 최근의 주목받는 연구결과로서 일본 Kyushu 공대의 Hayase 교수팀은  $TiO_2$ -nanotube 전극 구조 (T-NAH-AL)를 도입하여 발광효율을 개선한 ECL 소자를 발표하였다[21]. 이 방식에 의하면,  $TiO_2$ -nanotube의 길이나 두께를 최적화함으로써 종래의 구조와 비교할 때 2배 이상 발광효율이 개선되는 효과를 얻었다. 산화물 전극과 금속착체 구조 산화-환원 발광 층으로 구성된 ECL 소자는 고효율 발광소재의 개발뿐만 아니라, 전극소재 및 구조 개선을 통해서 소자의 성능을 효율적으로 개선할 수 있다는 연구 방향은 앞으로 더욱 활성화될 것으로 전망된다. 표 1에 대표적인 ECL용 발광재료를 나타내었다.

표 1. 대표적인 ECL용 발광재료와 파장

발광재료	발광 피크 파장
Anthracene	457nm
Rubrene	567nm
9,10-diphenylanthracene(DPA)	429nm
Pyrene	393nm
$Ru(bpy)_3^{2+}$	620nm

출처) Allen. J. Bard, Electrogenerated Chemiluminescence, 2008.

### 3. ECL의 당면과제

위와 같이 ECL의 발광재료에 대한 활발한 연구가 진행 중임에도 불구하고 아직 표시소자로서 실용화 단계에 미치지 못하고 있는데, 이는 우수한 발광특성

을 나타내는 신규 물질의 개발과 ECL 소자의 고성능화를 위한 다양한 전극 구조에 대한 연구가 미흡하여 디스플레이로서의 실용화 가능 기준인 5만 시간의 소자 수명을 확보하지 못했기 때문이다. 여기에는 여러 가지 이유가 있겠지만 크게 다음의 3가지 측면으로 요약 할 수 있다. 우선 ① 고성능·고휘도·고효율 및 장수명의 발광재료를 개발하지 못한 점, ② 고체/액체 접합형 이중계면 구조 즉 “금속/산화물” 계면 또는 “산화물/전해질” 계면에 있어서의 문제점, ③ 소자의 최적화 설계 및 제작의 문제 등이 복합적으로 작용하고 있다. 따라서 ECL이 상용화 수준에 도달하기 위해서는 여전히 넘어야 할 장벽이 많이 남아 있다.

#### 3.1 ECL 발광재료

1982년 미국 Texas at Austin 대학의 Bard 교수팀에 의해 Polymer를 사용한 ECL 소자가 구체화된 이후, 상용화를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 지금까지 금속 착물 구조로 개발된  $Ru(bpy)_3^{2+}$ 가 ECL의 발광재료로서 가장 많이 사용되고 있으며, 그 외 다양한 유/무기 발광재료가 보고되고 있다. 이들 발광재료는 페이스터 형태로 만들어져 고가의 반도체 진공장비를 거치지 않고 Screen-printing법이나 Spin-coating법에 의해 간단히 도포할 수 있으므로 소자의 제작이 간단하다. 그러나 ECL에 사용되는 발광소재는 액체나 준 고체 상태의 전해질에 함유되어 있는 구조이므로 전극을 밀봉하는 공정이 반드시 수반되어야 하며, 밀봉상태에 따라 소자의 장기 안정성이 민감하게 영향을 받는 문제점이 있다. 미국 MIT 공대의 Rubner 교수를 비롯하여 많은 연구자들이 고체형 ECL 소자의 개발을 위해 노력하고 있지만, 고체화에 따른 전하의 이동도 저하와 이중계면에서의 전하전달 및 반응효율이 낮아져서 응답속도 또한 ms로 느려지는 등, 아직도 많은 문제점들을 내포하고 있다.

### 3.2 ECL 전극구조 및 설계

그동안 ECL 연구는 주로 발광물질의 개발에 집중되어 왔고, 이를 구체화한 소자의 제작에 있어서는 Bard나 Rubner 연구팀이 제안해 온 “TCO전극/발광전해질/TCO전극” 구조의 종래방식에 의존해 왔다. 최근 주목받는 보고로서는 발광효율을 극대화할 수 있는 전극구조를 개발하는 연구이다. Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>의 ECL방식을 예로 들면, 발광효율은 전극근방에서의 Ru(II) 분자의 산화-환원 작용과 Ru(I)와 Ru(III) 간의 재결합 과정에 크게 영향을 받게 된다. 그러므로 전극의 비 표면적을 증대시킴으로써 전극표면에서의 전하전달 및 반응의 극대화를 꾀할 수 있어 발광효율을 개선할 수 있는데, 최근의 Hayase 교수팀의 연구 보고는 이러한 점에서 주목할 만하다(그림 4 참조). 그러나 Hayase교수팀이 도입한 전극은 TiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 소재로 한 나노튜브(T-NAH-AL)구조로써 구조가 다소 복잡하고, 단락방지를 위한 스페이서가

들어가는 등, 제작이 복잡한 단점이 있다. 게다가 비 표면적 뿐만 아니라, 전극/전해질 계면이 가지는 전기용량도 고려해야 할 중요한 인자로 작용하는데, 일반적으로 비 표면적이 증가할수록 계면의 전기용량도 증가하지만, 전극의 재료와 발광분자의 크기 등에 따라 전기용량을 최대로 하는 최적의 기공조건이 존재하게 된다. 전극표면에 존재하는 T-NAH-AL 구조의 직경들은 100~200nm로 보고되고 있는데, 전극/전해질 계면에서 Ru(I)와 Ru(III) 분자 전하의 생성에 요구되는 최적의 기공 사이즈에 대해서는 구체적으로 명시하지 않고 있다. 그러므로 단순히 표면적이 크다는 이유로 나노튜브 구조의 전극을 사용하여 제작되었으나, 나노튜브의 큰 표면적을 효율적으로 이용하지 못하면 큰 표면적에 비해 전기용량이 작아지는 문제점을 지니고 있다. 그리고 또 하나의 문제점으로서, 어노드 전극소재로써 TiO<sub>2</sub>를 사용하였는데, 일반적으로 TiO<sub>2</sub>층의 일함수는 약 -4.2eV이며, Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>의 Lowest unoccupied molecule

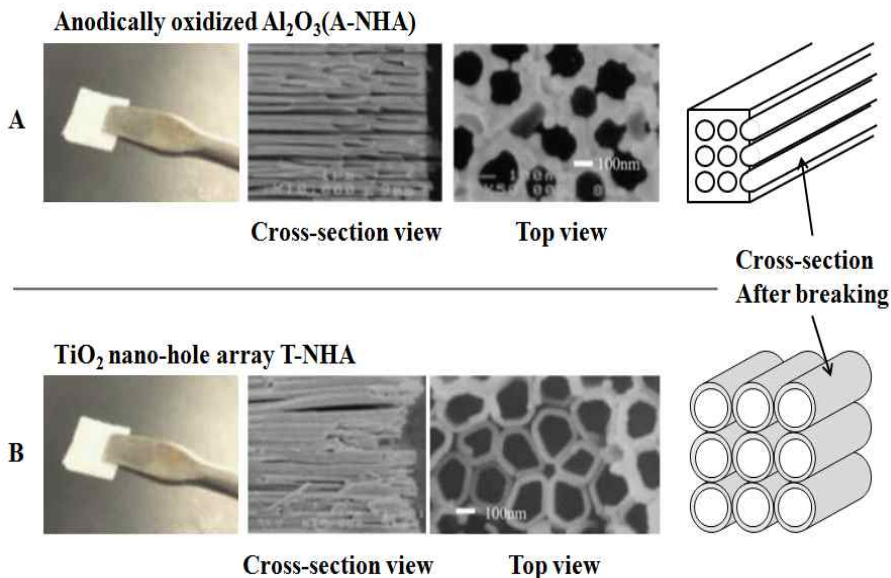


그림 4. 나노구조물 전극 기반 고효율 ECL 소자  
(일본 Kyushu공대 Hayase 교수팀, 2010)



orbital (LUMO) 준위 (-3.26eV) 측에 근접해 있다. 즉 정공이 TiO<sub>2</sub>층의 Highest occupied molecule orbital (HOMO) 준위로부터 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>의 HOMO 준위 (-5.75eV)로 이동하는데 있어서 높은 주입장벽으로 존재하게 된다. 그러므로 TiO<sub>2</sub>층을 어노드로 할 경우, TiO<sub>2</sub>층에서 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>의 HOMO 준위로 원활한 정공의 주입이 어려워지게 되어 발광 효율의 측면에서 그다지 효율적이지 못할 것으로 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 크게 두 가지 방안을 고려할 수 있다. 첫째, TiO<sub>2</sub>를 사용할 경우, 상대전극에 일함수가 큰 전극을 도입할 필요가 있다. 그리하여 각 전극에 효율성 있게 전자주입과 정공주입을 유도함으로써 셀의 발광효율을 개선할 수 있을 것으로 예측된다. 구체적으로 TiO<sub>2</sub>를 캐소드로 사용하고 Pt 등의 일함수가 큰 소재를 어노드로 사용하는 방안이 고려될 수 있다. 둘째, TiO<sub>2</sub> 대신에 나노구조의 ITO나 FTO를 적용하는 방안도 고려할 만하다. 예를 들어 ITO의 경우, 일함수가 -4.7eV로서 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>의 HOMO/LUMO 준위의 중간정도에

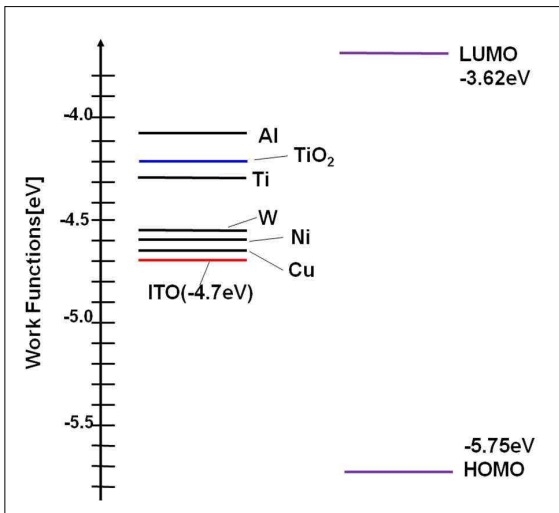
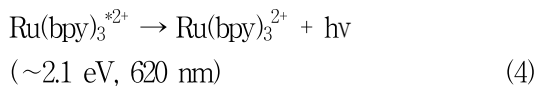
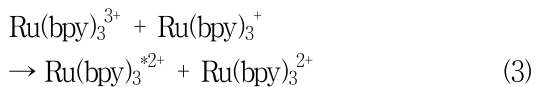
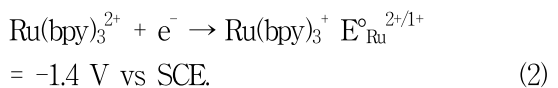
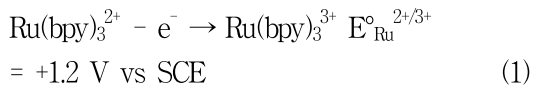


그림 5. ECL 전극재료와 발광층간의 HOMO/LUMO 준위

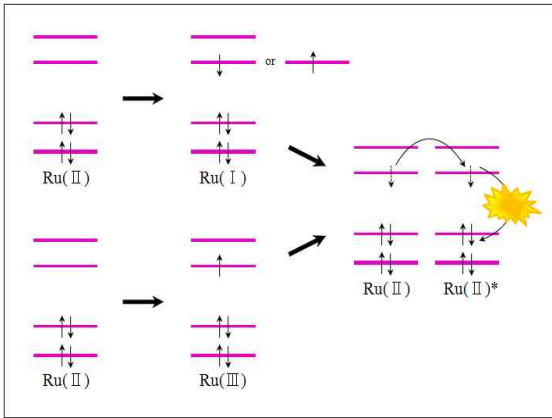
위치하므로, 전자주입과 정공주입 어느 쪽도 치우치지 않는 적절한 균형을 유지할 것으로 판단된다. 이상 언급한 바와 같이, 셀의 발광 효율을 최대화 하는 최적의 전극 구조와 적절한 재료의 선정은 앞으로 연구되어야 할 과제이다.

### 3.3 발광효율 향상 메커니즘 향상

최근의 개선된 ECL 소자는 TCO/발광층/TCO의 구조에서 새롭게 나노입자층을 전극표면에 도입한 구조이다. 나노입자 층은 약 10 μm의 두께를 가지며, 일반적으로 나노 다공질 구조의 TiO<sub>2</sub>층을 사용하고 있으며, 다공질 표면에 발광물질인 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup> [Ru(II)]가 다량 함유되어 있는 형태이다. 전압을 인가하면 Ru(II)는 음극 근방에서 Ru(I)으로 환원되고, 어노드에서는 Ru(III)로 산화된다. 이들 Ru(I)과 Ru(III) 입자들이 재결합하는 과정에서 발광 현상이 일어난다. 식 (1)~(4)는 전 과정에 대한 개념도와 반응식을 각각 나타내며 이를 도식화하여 그림 6에 나타내었다.



ECL의 발광효율을 높이기 위해서는, 우선 이론적으로 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup> 분자 내의 전하생성 및 전달과정에

그림 6. Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup> 기반의 ECL 개념도

대한 충분한 이해를 바탕으로 양자 효율 (quantum efficiency;  $\eta_{ecl}$ ) 향상의 측면에서 접근해 나가야 할 것이다. Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>에서 전자는 중심금속(Ru)의 d궤도에서 배위자의  $\pi$ 궤도로 여기 되어 [Metal-Ligand Charge Transfer (MLCT) Transition], 여기 전자는 곧바로 기저상태로 떨어지지 않고 삼중항 전위를 거치게 되면서 높은 양자효율의 인광을 방출하게 된다. 그러므로 ECL에서의 양자효율  $\eta_{ecl}$ 은 식 (5)와 같이 Ru(I)과 Ru(III)의 재결합 수에 대한 방출된 광전자 수로써 정의된다.

$$\eta_{ecl} = \frac{\int_t^0 Idt}{\int_t^0 i_{c,a} dt} = \frac{\int_t^0 Idt}{Q_{c,a}} \quad (5)$$

여기서  $I$ 는 임의  $t$ 시간 동안의 발광강도,  $i_{c,a}$ 와  $Q_{c,a}$ 는 음극과 양극에서의 전류 및 전하량을 각각 나타낸다. 현재 ECL의 양자효율  $\eta_{ecl}$ 은 약 5%인 것으로 알려져 있는데, 효율을 높이기 위해서는 음극과 양극 근방에서의 전하량 밀도분포를 증대시켜 전류량을 증가시키고, 발광분자의 MLCT 천이를 활성화시켜 삼중항 극대화하는 방안을 모색해야 한다. 이를 위한

구체적인 방법을 들면 다음과 같다.

- ① 나노 복합구조 전극형성에 의해 비 표면적과 전 기용량  $Q_{c,a}$ 를 증가시키는 방안
- ② 나노 복합구조 박막의 전하 이동도 향상을 통한  $i_{c,a}$ 를 증가시키는 방안
- ③ 산화-환원 중 Ru(I), Ru(III)의 생성 효율 및 이동도의 향상 방안
- ④ HOMO/LUMO 준위 및 일함수의 이론적 고찰을 통한 전하전달 효율 개선
- ⑤ MLCT에 의한 삼중항 천이발광의 효율향상 메카니즘 개발
- ⑥ 고효율의 새로운 금속착체 구조 발광재료 개발.
- ⑦ 새로운 고효율 소자 구조 개발 (tandem cell, p-i-n 구조, quantum effect 활용 등)

### 3.4 RGB 구현기술 확보

ECL에서의 고효율이면서 안정된 RGB 발광의 구현은 상용화의 측면에서 반드시 해결해야 할 당면과제이다. 현재 이에 대한 해결 방안으로써 발광의 효율과 안정성 면에서 다른 고분자 재료들에 비해 양호한 특성을 나타내는 금속 착물과 고분자 구조의 발광소재에 주목하고 있다. 그동안 Ru(bpy)<sub>3</sub><sup>2+</sup>를 기반으로 하는 적색발광(Red-ECL)을 비롯하여 다양한 고분자 재료를 이용한 녹색 (Green-ECL) 및 청색 발광 (Blue-ECL)에 대한 연구보고가 발표되고 있다. 하지만 장기 안정성 측면에서 기대에 못 미치고 있으며, 최근 배위결합체의 중심금속을 적절히 선정하면 다양한 발광과장을 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그림 7은 현재 개발된 ECL 발광재료를 나타내고 있다.

## 4. ECL 기술의 중요성과 전망

ECL 소자는 크게 기판, 발광재료, 전극 등이 포함

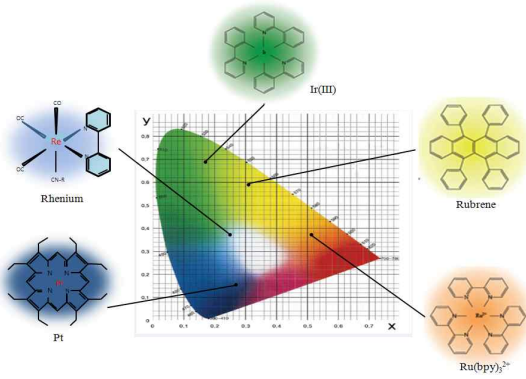


그림 7. ECL 발광소재 및 발광영역

되는 소재 기술과 Printing, 박막 형성 등의 프로세스 기술, 그리고 표시기능을 결정하는 컬러화 기술, 소자의 수명과 관련 있는 봉지(sealing) 및 패키징(packaging) 기술 등으로 구분할 수 있다. 특히 발광재료 기술은 소자의 모든 특성을 좌우하는 가장 핵심이 되는 기술로서 발광효율을 극대화할 수 있는 유/무기 발광재료에 대한 연구는 앞으로 보다 체계적으로 진행되어야 할 것이다. 특히 금속착물 구조를 이용하여 컬러화를 실현시킬 수 있는 고효율 발광재료의 개발은 ECL이 차세대 표시소자로서 부각되는 매우 중요한 연구이다. 더욱이 중심 금속과 배위결합 분자의 최적 설계를 통해 인광현상을 이용하여 발광효율을 극대화시킬 수 있는 고성능의 무/유기 발광재료를 개발할 수 있다는 점에서 향후 ECL 연구는 중요한 의미를 지닌다. 그리고 발광효율에 대한 종래의 연구가 전극 표면에서의 산화-환원 반응에 의한 에너지 전달 현상에 주안점을 두고 있으나, 나노복합구조의 전극표면이 전하전달 및 반응에 미치는 영향에 대해 체계적인 연구를 진행하여 발광 효율을 극대화시킬 수 있는 방안을 확립할 필요가 있다. 그리고 상용화의 관점에서, ECL은 차세대 발광/디스플레이 분야의 주목할 만한 기술로서, 앞으로 새로운 발광 소재 및 소자에 관련한 핵심기술과 RGB 구현이 가능한 ECL

소자가 개발되면, 초저가, 고효율이면서 투명성을 지니는 차세대 발광/디스플레이 소자로서 기대된다. 특히 3V이하의 직/교류 양방구동이 가능하여 기존의 LED나 OLED에서 지적되고 있는 직류구동 방식으로부터 야기되는 문제점들을 극복할 수 있으므로, 다양한 용도의 사업화 추진이 가능하다. 그림 8은 ECL이 디스플레이 소자로서 활용될 경우, 예상되는 이점이 종래의 방식과 비교한 것이다.

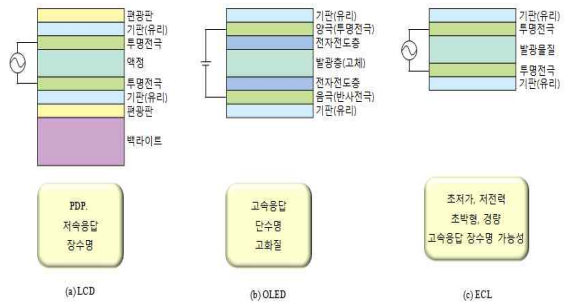


그림 8. ECL 기술을 디스플레이에 응용할 경우 예상되는 이점

이와 같이 ECL 소자에 최적화된 고효율 발광소재 개발과 소자 구조의 개선을 통한 에너지 전달 향상을 규명하는 연구 방향은 ECL 분야에서 break-through 및 원천 기술을 확보한다는 차원에서 앞으로 국내연구의 활성화가 시급한 연구 분야이다. ECL 연구는 아직까지 국내에서는 시작단계에 불과한 새로운 학문분야이므로, 국내의 연구기반 확보차원에서 학문적으로 중요한 위치를 차지하며, 향후 많은 신진 전문연구인력의 관심과 참여가 기대된다.

**감사의 글**

이 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2010-0013541).



## 참고 문헌

- [1] Jiun-Haw Lee, David N. Liu and Shin-Tson Wu, "Introduction to Flat Panel Displays." Wiley Series in Display Technology, 2009.
- [2] 한국기술거래소, '유기발광 디스플레이 기술 및 시장동향', 한국기술은행, 2007.
- [3] Andreoni, W. et al., "Lithium-aluminum contacts for organic light-emitting devices", Appl. Phys. Lett. 71, pp.1151-1153, 1997.
- [4] 전자부품연구원 "주간전자정보(LED/LD/OLED 관련 국내외 제품 및 시장의 최근동향", 2006.
- [5] Bard, A. J.; Faulkner, L. R. Electrochemical Methods Wiley: New York, 1980.
- [6] Bard, A. J.; Faulkner, L. R. Electrochemical Methods Fundamentals and Applications, 2nd ed.; Wiley: New York, 2001.
- [7] M. Gratzel, "Photoelectrochemical cells", Nature, Vol. 414, pp.338-344, 2001.
- [8] Jong-Hyun Heo et al., IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 37, issue 8, pp.1586-1592, 2009.
- [9] 권혁문 외, "나노입자 이산화티타늄 전극기반의 고효율 전기화학형 발광셀 제작," 대한전기학회.
- [10] Abruna, H. D., Bard, A. J., J. Am. Chem. Soc. 1982, 104, 2641.
- [11] McCord, P. M.; Bard, A. J. J. Electroanal. Chem. 1991, 318, 91.
- [12] Hartmut Rudmann, Satoru Shimada, and Michael F. Rubner, J. Am. Chem. Soc. 2002, 124, 4918-4921.
- [13] H. Rudmann and M. F. Rubner, J. Appl. Phys. 2001, 90, 4338-4345.
- [14] Erick S. Handy, Amlan J. Pal, and Michael F. Rubner, J. Am. Chem. Soc. 1999, 121, 3525-3528.
- [15] Richter, M. M. Chem. Rev. 2004, 104, 3003-3036.
- [16] Walworth, J.; Brewer, K. J.; Richter, M. M. Anal. Chim. Acta 2004, 503, 241.
- [17] Cole, C.; Muegge, B. D.; Richter, M. M. Anal. Chem. 2003, 75, 601.
- [18] Factor, B.; Muegge, B.; Workman, S.; Bolton, E.; Bos, J.; Richter, M. M. Anal. Chem. 2001, 73, 4621.
- [19] K. Nishimura, Y. Hamada, T. Tsujioka, S. Matsuta, K. Shibata, and T. Fuyuki, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 40, L495 2001.
- [20] K. Nishimura, Y. Hamada, T. Tsujioka, S. Matsuta, K. Shibata, and T. Fuyuki, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 40, L1323 2001.
- [21] Ide Kenichi et al., Journal of the Electrochemical Society, Vol. 155, No. 7, pp. 645-649, 2008.

## ◇ 저자 소개 ◇



성열문(成烈汶)

1992년 부산대 전기공학과 졸업. 1994년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~1999년 일본 Kyushu 대학(박사후 과정, 조수). 2000~2006년 일본 Miyazaki 대학(조교수). 2006년~현재 경성대학교 전기공학과 교수. 2011~2012년 미국 UW-Madison(방문교수).

Tel : 051-663-4777

Fax : 051-624-5980

E-mail: ymsung@ks.ac.kr