



백색 LED용 플레이트 형광체 패키징 기술

글 _ 김진명, 이재욱, 박영조
한국기계연구원 부설 재료연구소

1. 서론

우리나라는 에너지의 96%를 수입에 의존하고 있는 철저한 에너지 수입국으로서, 2010년 에너지 수입비용은 141조원으로 국내 수입액 중 28.6%를 차지했고 2011년 예산(300조원)의 절반 수준에 달했다. 국제적으로 보면 2012년 국내 연간 에너지 소비량은 237.5백만 TOE로서, 세계 에너지 생산량 중 2.1%를 소비하는 세계 9위의 에너지 소비국이다. 또한 에너지 전력소비 연평균 증가율은 약 6%로 에너지 사용 효율화와 절약운동에도 불구하고 전력소비량은 매년 크게 늘어나고 있다.

작금의 상황을 타계하고자 원자력 에너지 (제 3의 에너지) 및 신재생 에너지 (제 4의 에너지)의 보급 및 개발이 진행되고 있지만 전자는 후쿠시마 원전 사고에서 인지된 안전 및 환경 문제로 인해, 후자는 개발에 장시간이 소요된다는 문제로 인해 여전히 에너지 문제 해결에는 역부족인 현실이다. 이로 인해 세계 각국에서는 제 5의 에너지로 불리는 “에너지 절약”을 가장 현실적인 에너지 문제 해결 방안으로 두고 국가적으로 R&D를 대폭 지원하고 있다. LED 산업은 에너지 절약의 첨병으로, 에너지 효율이 낮은 백열등과 형광등을 대체할 유일한 대안으로 자리매김하고 있다. 특히 전력소비가 크고 효율이 5%미만인 백열전구의 판매와 사용을 금지하는 법안이 2012년부터 본격적으로 시행되기 시작하면서 LED 산업의 성장이 탄력을 받고 있다 (Table 1). 미국은 2013년 현재 100W와 75W 백열전구의 생산과 수입이 중지되어 있

며, 60W와 40W 백열전구도 2014년까지 생산과 수입이 점진적으로 중단될 예정이다. 유럽은 이미 2012년 9월 이후 모든 종류의 백열등에 대한 생산, 수입, 판매를 금지하고 있다. 우리나라도 2013년부터 기존의 백열등 판매와 재고가 금지되었다. 심지어 EU의 경우 유해물질사용제한지침, 재활용비용생산자부담정책 등의 규제로 인해 일반 형광등의 생산도 줄어들고 있다.

LED는 저소비전력 및 고효율, 긴 수명, 수은등의 유해물질 배제, 발광 파장 변화를 통한 다변적 적용 등의 장점을 가진 발광소자로서 조명, 디스플레이 백라이트 (BLU), 의료등, 자동차 헤드램프, 지시등, 식물재배등 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. LED 광원은 현재 디스플레이의 백라이트와 모바일 기기에 사용되는 비중이 가장 크지만, 55조에 달하는 백열등 시장을 점차 대체하면서 조명용 LED의 비중이 가장 커질 것으로 예상되고 있다. 2012년 LED 조명 매출은 전체 가정 조명 시장의 3%에 불과하지만 다른 조명에 비해 가장 빠른 성장을 기록하고 있으며, 금융기관 골드만삭스의 예측에 따르면

Table 1. 국가별 백열전구 사용 금지 정책

국 가	백열전구 사용 금지 시기 및 단계
미국	2012년 100W급 이상 사용 금지
	2014년 40W급 이상 사용 금지
EU	2009년 100W급 사용 금지
	2012년 9월부터 백열전구 사용 금지
일본	2012년 백열전구 사용금지
중국	2015년 백열전구 30%를 LED로 교체
우리나라	2013년 백열전구 생산 및 재고 금지
기타	2010년 호주 / 2012년 대만, 캐나다
	2014년 러시아



2015년 가정조명시장에서 LED가 차지하는 비중이 16%로 증가할 것으로 전망하고 있다. 우리 정부도 2015년까지 일반 조명의 30% 정도를 LED 조명으로 대체키로 했고 1조원 수준의 LED 펀드를 조성하기로 했으며 LED를 22개 신성장동력의 하나로 지정하였다. LED 조명 시장은 2012년 12조원 수준에서 2013년 21조원, 2015년 41조원 규모로 급격히 성장할 것으로 전망된다.

LED 조명 시장이 개화하면서 국내에서 대기업, 중견 중소기업 등이 LED 시장에 뛰어들지만 오스람, 필립스, 니치아 등의 LED 선진 기업의 높은 장벽으로 인해 후발 주자의 시장 진입이 어려운 상황이다. 특히 우리나라의 경우 어느 정도의 경쟁력을 확보하고 있는 패키징 기술과 달리, LED용 형광체 기술은 일본 업체를 중심으로 특허권을 배타적으로 행사하기 때문에 다른 LED 기술의 성공적 개발에도 불구하고 제품화에 실패할 수 있는 위험이 크다. 본고에서 소개하는 “플레이트 형광체”는 외국계 원천특허에 의해 사용제약을 받고 있는 분말 형광체와 비교하여 우리나라에서도 선점이 가능한 미래소재로 특허 분쟁을 피할 수 있는 분야이다.

2. 플레이트 형광체의 특징 및 종류

기존의 형광체 패키징은 형광체 분말과 수지를 혼합한 페이스트를 LED 위에 도포하는 방식으로 이루어져 왔다. 하지만 이 경우 형광체 분말의 불균일 혼합, 수지의 열화에 따른 색좌표 이동, 낮은 열전도성 및 높은 패키징 불량률 등의 문제가 발생하여 LED의 신뢰성, 안정성을 저하시키는 주요 원인이 된다. Fig. 1에 묘사된 플레이트 형광체 기반 LED 패키징의 경우 수지의 사용을 배제하고 열적 기계적 특성이 우수한 플레이트 형광체를 도입함으로써 기존 페이스트 기반 패키징의 문제점들을 획기적으로 개선할 수 있다.

종래의 페이스트 패키징과 비교할 때 플레이트 형광체의 장점은 (1) 정밀 면가공으로 플레이트의 두께 균일도가 우수하므로 100:1 이상의 높은 색대비와 동시에 낮은 색산포를 구현, (2) 열색좌표(Thermal color shift) 이동 감소 (3) 우수한 발광각 균일도 (Radiation uniformity), (4)

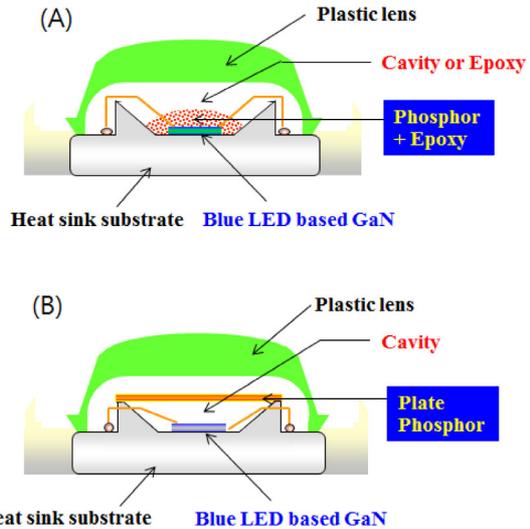


Fig. 1. (A) 기존의 페이스트 기반 패키징, (B) 신개념 형광체 플레이트 기반 패키징.

플레이트의 실장 전 단계에서 형광특성 스크리닝을 통한 binning 문제 해결, (5) 고출력 LED 적용시 안정성 및 신뢰성 확보 등을 들 수 있다(Fig. 2). 특히 플레이트 기반 패키징은 3세대 패키징 기술로 분류되며 산업 발전상 현재 도입기에 있기 때문에 기술 확보 시 세계시장 선점의 가능성이 높은 기술이라고 할 수 있다.

플레이트 형광체는 제조 방식에 따라 (1) 분말 소결법에 의한 세라믹 플레이트 형광체, (2) 형광체와 투명 유

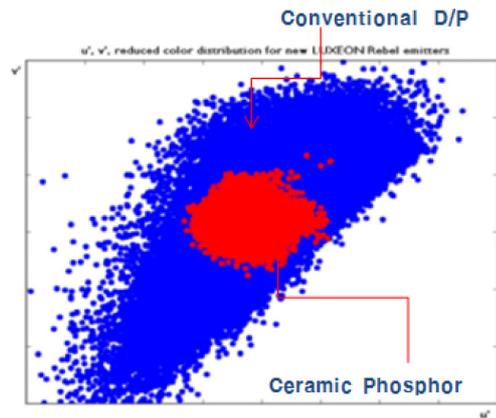


Fig. 2. 기존 페이스트 분산 대비 플레이트 형광체의 우수한 발광각 균일도 (Philips).



리의 복합체인 형광체 분산 유리 플레이트 형광체, (3) 양자점과 투명 고분자의 복합체인 양자점 시트 형광체로 분류될 수 있다(Fig. 3). 본고에서는 각 방식별 플레이트 형광체의 특징 및 연구동향에 대해서 보고하고자 한다.

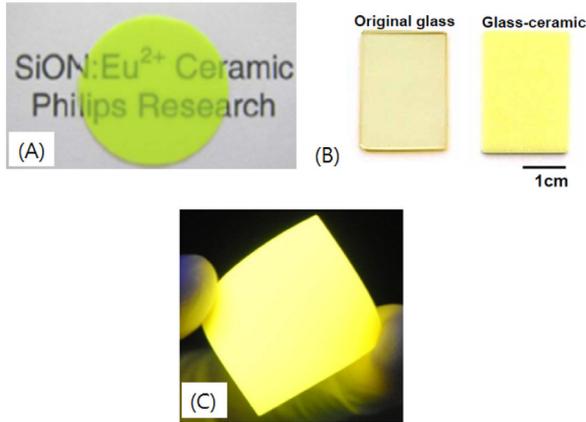


Fig. 3. (A) 세라믹 플레이트 형광체 (Philips), (B) 형광체 분산 유리 플레이트 형광체 (NEG), (C) 양자점 시트 형광체 (홍익대 양희선교수팀).

3. 세라믹 플레이트 형광체 기술

세라믹 플레이트는 산화물, (산)질화물 형태의 세라믹 분말을 소결 공정을 통해 치밀화 시켜 제작한다. 세라믹 플레이트는 열전도도가 약 5-15 W/m-K로서 0.1-0.2 W/m-K 수준의 페이스트 방식에 비해 열전도도가 100배 정도 우수하여, 고효율 LED 구동시 방열문제를 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있다.

세라믹 형광체 플레이트는 미국 Philips 사의 Phosphor plate 특허 (2007) 및 Lumiramic™ 형광체를 탑재한 Luxeon (2008) 제품 판매를 기점으로 본격화되었다.¹⁾ 이미 잘 알려진 YAG:Ce³⁺ 형광체 분말을 소결한 세라믹 형광체 판에 thin film flip chip (TFFC)을 도입한 Lumiramic™을 적용하는 경우 약 93 lm/W의 효율을 달성한 것으로 보고되었다 (Fig. 4). 뿐만 아니라 백색 LED 광원 제조업체들이 양산단계에서 어려움을 겪고 있는 색 좌표 분산에 따른 binning 문제를 개선할 수 있으며 균일한 발광학 균일도를 달성할 수 있다고 보고하였다. 또 다른 LED 업체인 Osram 역시 YAG 세라믹 플레이트를

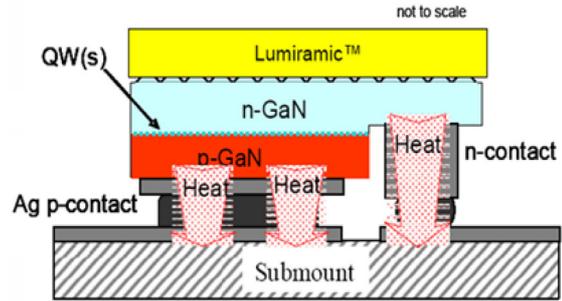


Fig. 4. 필립스 Lumiramic™ 형광체 기술의 개략도

적용한 제품을 출시하였으며 낮은 CCT ($C_x > 0.35$) 영역에서 휘도가 증가하는 것으로 보고하였다. 이외에도 YAG와 투명 알루미나를 혼합 소결한 MTC (molten growth composite) 형광체에 대한 특허도 출원된 바 있다. YAG의 경우 Nd, Er, Yb 등을 doping하여 레이저 발진을 위한 다결정 투명 세라믹 소결에 관한 연구가 오래 전부터 이루어졌기 때문에 유사한 방식으로 YAG에 Ce를 doping하여 다결정 투명 세라믹 형광체를 제조한 것이 일본 교토대학의 니시무라 교수팀으로부터 발표되었다 (Fig. 5)²⁾. 니시무라 교수팀은 200-300 nm 가량의 Ce:YAG 분말을 1780°C에서 20시간동안 진공 소결하여 고밀도, 고투광성 세라믹 플레이트 형광체를 제조하였으며, 백색 LED 제작 시 약 73.5 lm/W의 효율을 달성하였다.²⁾

국내에서는 재료연구소와 삼성전자 공동연구팀에 의

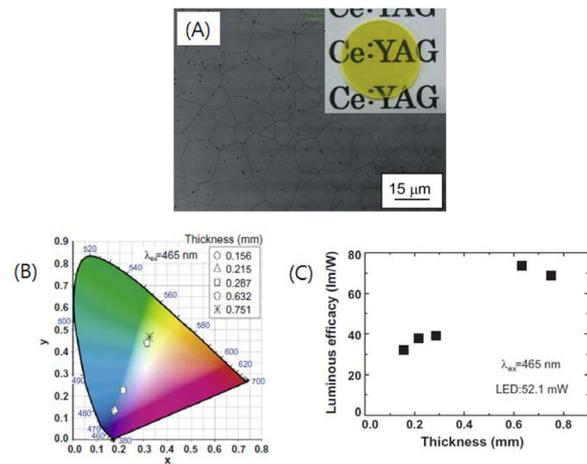


Fig. 5. 진공 소결 및 경면 연마 후 YAG:Ce³⁺ 세라믹 플레이트 형광체의 미세구조 (A) 및 플레이트 두께에 따른 색좌표 변화 (B) 및 발광 효율 변화 (C).²⁾

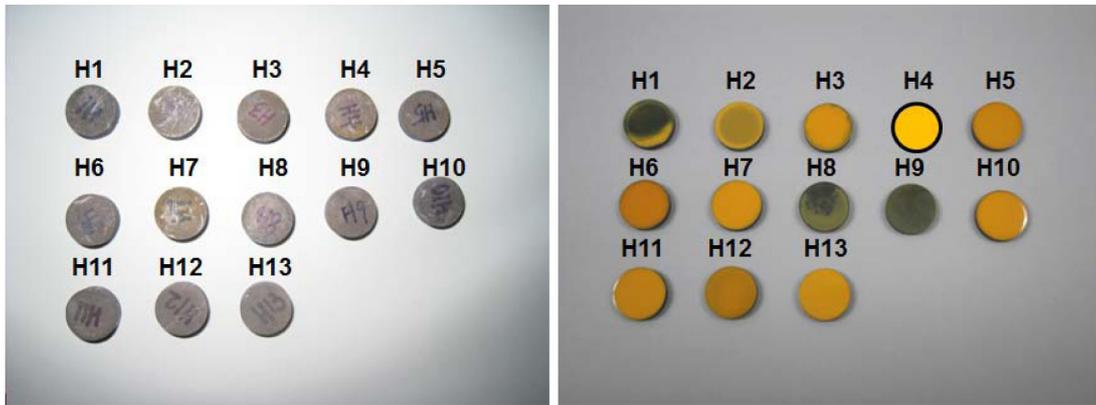


Fig. 6. Ca- α -SiAlON:Eu²⁺ 플레이트 형광체의 Sinter-HIP 공정 제작 (재료연구소³). HIP 직후 (좌), 표면층 연삭 및 연마 후 (우).

한 Ca- α -SiAlON:Eu²⁺ 형광체의 플레이트 소결 및 LED 패키지 광특성 평가 연구가 수행되었다 (2010-2011). 이 과제를 통하여 고밀도 소결체 제조를 위한 사이알론 조성 및 분위기 분말 최적화, Sinter-HIP 공정조건 등에 대한 연구가 수행되었다. 그 결과 상대밀도 $\geq 99\%$ 와 분말 대비 반사모드 PL $\geq 30\%$ 수준의 플레이트 형광체가 개발되었으며 LED 패키징 후 분말 패키지 대비 약 60% 정도의 휘도를 달성하였다. 또한 표면 에칭 조건 및 발광 비표면적 증가에 의한 휘도 향상 기구를 규명하였다 (Fig. 6). 또한 청색 LED 광원에 의해 녹색 발광하는 β -SiAlON:Eu²⁺ 형광체를 플레이트화하기 위하여 밀링 조건 및 소결 변수에 따른 고밀도 치밀화 조건을 탐색하였다.³⁾

세라믹 플레이트 형광체의 광효율을 높이는 것은 세라믹 분말 자체의 양자 효율 (quantum efficiency) 뿐 아니라 여기-발광된 빛을 외부로 잘 추출하는 광추출 효율도 중요하다고 할 수 있다. 즉 wave guiding 효과에 의한 광추출 효율 감소를 효과적으로 제어할 수 있어야 한다. 이를 해결하기 위해 세라믹 플레이트 형광체의 표면에 광결정(photonic crystal)을 도입하여 효율을 증대시키는 연구가 보고되었다. 국민대학교 도영탁 교수팀의 발표에 따르면 세라믹 플레이트 YAG 형광체에 SiN_x 나노홀(nano hole)의 이차원 광결정을 도입하여 광추출 효율이 증가하였으며 이를 고휘도 LED를 위한 형광체로 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다 (Fig. 7).⁴⁾

세라믹 플레이트 형광체는 필립스 Luxeon 외에도 일

부 상용화가 이루어지고 있다. 삼성LED는 2012년 5월 출시한 기아자동차 K9 모델에 세라믹 플레이트 형광체가 적용된 LED 헤드램프를 탑재하여 양산화에 성공하였다 (Fig. 8). 앞으로 세라믹 플레이트 형광체는 플레이트 두께의 정밀한 조절, 이론밀도 치밀화 및 이차상의 제거, 세라믹 내의 optical path 제어, 후방 산란광의 최소화 등의 이슈에 관한 연구가 진행될 것으로 예상된다.

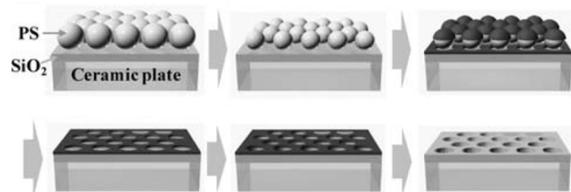


Fig. 7. YAG 세라믹 플레이트 형광체의 광추출 향상을 위한 광결정 도입 공정.⁴⁾



Fig. 8. 기아자동차 K9의 헤드램프에 장착된 플레이트 형광체 기반 LED.



4. 형광체 분산 유리 플레이트

형광체 함유 유리 플레이트는 제조 방식에 따라 Phosphor Glass Ceramics (PGC), Bulk Glass Phosphors (BGP), Phosphor in Glass (PiG) 3가지로 분류할 수 있다.

첫째로 Phosphor Glass Ceramics는 원료분말의 용융, 급랭을 통해 유리상을 제조한 후 어닐링을 통해서 형광체 결정상이 유리 매트릭스에 석출되는 방식이다. YAG:Ce³⁺의 경우 SiO₂-Al₂O₃-Y₂O₃ 유리를 1500-1650°C 열처리를 통해 용융, 급랭 후 1200-1500°C에서 어닐링 시킴으로서 YAG 단입상이 균일하게 결정화된 플레이트 형광체를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다 (Fig. 9).⁵⁾ 또한 실리케이트 형광체에 대해서도 이 방식이 보고된 바 있지만, 저온에서 액상을 충분히 형성하는 일부 형광체 조성에 제한된다는 단점이 있다. 또한 결정상 조성 및 결정화 비율을 정밀하게 조절하기 위한 연구가 필요하다.

둘째는 유리에 Eu^{2+,3+}, Ce³⁺ 또는 양자점 등의 발광 센터가 결정화 과정 없이 비정질 유리 내에서 직접 여기-발광하는 방식 (Bulk Glass Phosphor) 이다.⁶⁾ 주로 일본과 프랑스에서 연구가 진행 중이나 350 nm 이하의 UV 여기용으로 주로 연구가 발표되어 400 및 450 nm 부근의 상용 LED용 소재 개발은 미비한 실정이다. 또한 발광 센터 주변의 낮은 결정성으로 인해 효율이 낮은 단점이 있다.

셋째는 유리 분말을 형광체 분말과 혼합 및 성형한 후 소결하는 방식(Phosphor in Glass)으로서, 형광체의 종류에 관계없이 유리상 내 분산이 가능하고, 연색성 향상을 위해 여러 형광체를 혼합하여 사용할 수 있는 장점이 있

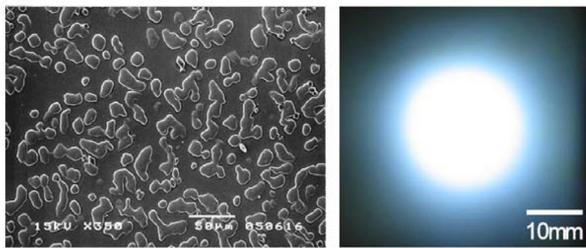


Fig. 9. YAG:Ce³⁺ Phosphor Glass Ceramics의 내부 미세구조⁵⁾ 및 청색 LED와 패키징 후 백색 발광 (우).

다. 특히 유리의 연화점은 세라믹 소결온도보다 상대적으로 낮기 때문에 저온 공정을 통한 제조 단가 절감이 가능하다. YAG 형광체에 PbO-SiO₂ 조성의 고투과율 광학 유리 SF57을 혼합한 후 소결한 형광체 분산 유리가 보고된 바 있다(Fig. 10).⁷⁾ 또한 일본의 주요 LED 업체인 Toyoda Gosei와 광학 유리 전문회사인 Sumita glass가 합작하여 Phosphor in Glass 방식의 패키지를 선보여 일본 일간공업신문사에서 수상하는 부품대상을 2009년도에 수상하기도 하였다 (Fig. 11). 또한 세계적인 유리회사인 독일 Schott 사, 일본 NEG 사에서 수년전부터 각종 전시회 출품 및 국내외 LED 업체에 마케팅을 추진해오고 있다. Phosphor in Glass 방식은 유해물질인 Pb가 없으면서도 고투과율을 유지하고, 형광체 분말이 열화되지 않는 저온 소결이 가능한 유리 조성의 개발이 중요 연구 이슈라고 볼 수 있다.

국내의 형광체 분산 유리 플레이트 형광체 관련 연구는 한국세라믹기술원과 (주) 파티클로지 참여로 중소기업청 중기혁신 과제 “고출력 청색 LED용 특수 색변환

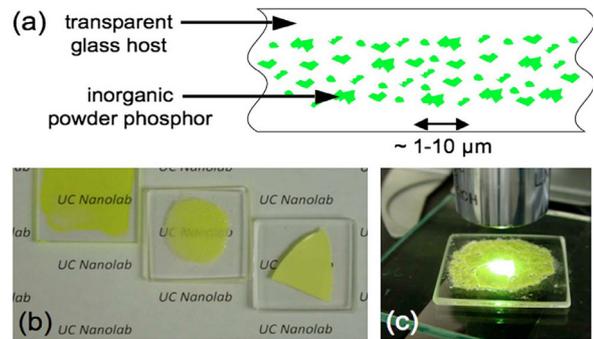


Fig. 10. YAG:PbO-SiO₂ Phosphor in Glass 형광체의 구조(a) 및 투광(b), 발광(c) 특성.⁷⁾

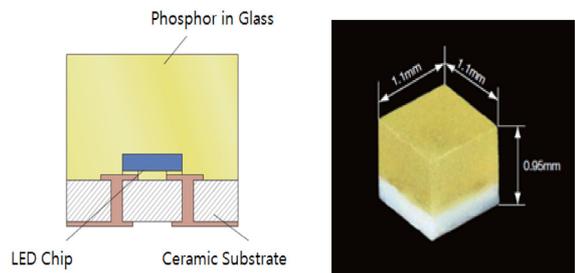


Fig. 11. Toyota Gosei의 Phosphor in Glass 패키징 개략도.



glass 개발” 과제가 수행되었으며 (2010.06-2012.05), 삼성전자 LED 사업부, 한국세라믹기술원, 포항공대 및 공주대에서 활발히 연구가 진행되고 있다.

5. 양자점 시트 형광체

양자점 시트 형광체는 양자점 형광체와 투명 고분자를 혼합한 후 경화시켜 제조된다. 이를 통해 양자점의 취약한 열적/환경적 안정성을 향상시키고 신뢰성 및 실용성을 확보하여 양자점 고유의 고연색성 및 낮은 색온도의 백색광을 구현할 수 있게 된다.

양자점 시트 형광체는 앞서 소개된 세라믹 플레이트 형광체나 형광체 분산 유리 플레이트 형광체에 비해 연구가 늦게 시작되었다. 현재 보고된 문헌은 제한적이며, 주로 시트가 아닌 벌크 및 박막 형태의 양자점-고분자 복합체에 대한 보고가 주를 이루고 있다. UC San Diego 대학의 Fainman 교수팀은 II-IV 계인 CdSe 양자점을 투명 고분자인 PMMA와 혼합한 벌크 복합체를 제조하여 보고하였다.⁸⁾ 또한 Virginia Polytech 대학의 Woelfle 교수팀은 이온성 액체(ionic crystal)에 의해 표면이 개질된 CdSe 양자점과 PMMA 간의 벌크복합체 형성에 관한 연구를 발표하였다 (Fig. 12).⁹⁾ 박막 형태의 경우 II-IV 양자점과 고분자 혼합체를 기판 위에 스핀 코팅을 통해 박막을 형성한 연구가 서울대 이성훈 교수팀에 의해 보고된바 있다.¹⁰⁾

미국의 Nanosys 사에서는 양자점-고분자 복합체 제조 기술을 바탕으로 LCD 디스플레이 백라이트(BLU)에 적용하는 기술(QuantumRail™)을 개발하였다. 양자점-고분자 복합체는 기존 YAG 형광체 기반 백색 LED에 비

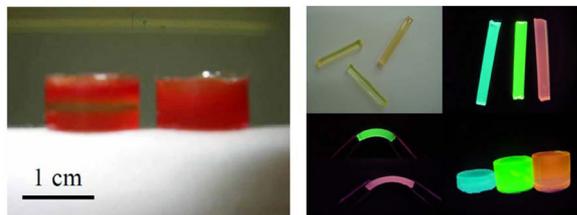


Fig. 12. 벌크형태의 양자점-PMMA 고분자 복합체 제조 사례 Fainman (좌) 및 Woelfle (우) 교수팀.^{8,9)}

해 높은 색 영역 달성이 가능하며 상용화를 위한 기술 개발이 진행 중에 있다 (Fig. 13). 국내에서는 LG 이노텍에서 상기 기술을 적용한 디스플레이 BLU의 양산화를 추진 중에 있다.

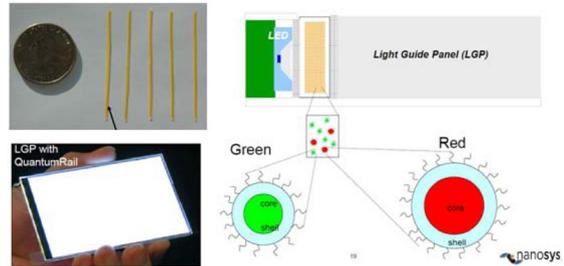


Fig. 13. Nanosys 사의 QuantumRail™ 기술의 개략도.

벌크 및 박막 양자점 복합체 외에 플레이트 형광체 적용을 위한 양자점 시트 형광체 연구는 홍익대 양희선 교수팀을 중심으로 보고되고 있다. 현재 발광효율이 우수한 II-IV 및 I-III-IV 계열의 양자점과 투명 고분자간의 free-standing 양자점 시트 형광체를 제조하고 LED에 응용하는 연구가 발표되었다 (Fig. 14).¹¹⁾ 향후 내부에 고효율 발광이 가능한 양자점 및 양자점 복합입자를 포함하는 복합체 및 열적/환경적 안정성 문제에서 신뢰성을 확보할 수 있는 제조공정 기술의 개발이 필요하다.

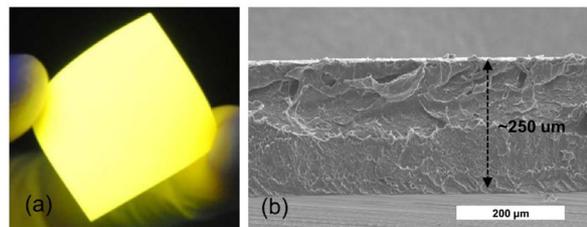


Fig. 14. CIS/ZnS/ZnS QD-PMMA 복합체 시트의 발광 ($\lambda_{exc}=365$ nm) (좌), 양자점 시트의 단면 (우).¹¹⁾

6. 결론

최근 우리나라에서는 여름과 겨울에 에너지 사용량의 폭발적인 증가로 인해 전력 수급에 적신호가 나는 경우가 빈번히 발생한다. 특히 고리원전, 신월성원전 고장 등 일부 원전 가동에 차질이 생길 경우 예비 전력이 위험수준으로 떨어지면서 전국적인 정전이 발생할 가능성도 배



제할 수 없는 상황이 되었다. 우리나라 전력수요의 약 18%를 차지하는 조명의 전력 소비량을 LED 보급을 통하여 줄인다면 안정적인 전력 수급이 가능케 될 뿐 아니라 에너지 절감을 통한 에너지 무역수지 해소에 일조할 수 있을 것으로 예상된다 (조명의 30%를 LED로 교체 시 2015년 전력사용량(예측치) 기준 연간 약 1조 6,000억 원의 에너지 절감 예상).

본고에서 소개한 “플레이트 형광체”는 현재 도입기에 있는 기술로, 기존 Blue LED/Phosphor 특허를 회피하여 세계 시장 선점의 잠재력이 높다. 플레이트 형광체 기술을 확보하기 위해서는 분말 형광체, 양자점 기술에 세라믹 소결기술, 유리 성형 기술, 양자점-고분자 복합 기술 등 다제간 융합이 필요한 신개념 첨단 기술이라고 할 수 있다. 백색 LED 용 플레이트 형광체의 개발은 에너지 절감 뿐 아니라 반도체, 디스플레이 산업 등의 전후방의 경쟁력을 높임으로써 국가 경쟁력제고에도 기여할 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

1. H. Gerard, B. Serge, and P. Mark, U. S. Pat. No. 20070215890, Philips Lumileds Lighting Company, LLC (2007).
2. S. Nishiura, S. Tanabe, K. Fujioka, and Y. Fujimoto, “Properties of Transparent Ce:YAG Ceramic Phosphors for White LED,” *Opt. Mater.*, **33** 688-91 (2011).

3. Y. J. Park, S. H. Lee, W. K. Jang, C. B. Yoon, and C. Yoon, “The High Density Sintering of Green-emitting β -SiAlON:Eu Ceramic Plate Phosphor,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **47** [6] 503-08 (2010).
4. B. K. Park, H. K. Park, J. H. Oh, J. R. Oh, and Y. R. Do, “Selecting Morphology of $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ Phosphors for Minimizing Scattering Loss in the pc-LED Package,” *J. Electrochem. Soc.*, **159** [4] J96-106 (2012).
5. S. Fujita, S. Yoshihara, A. Sakamoto, S. Yamamoto, and S. Tanabe, “YAG Glass-Ceramic Phosphor for White LED (I): Background and Development,” Fifth International Conference on Solid State Lighting, in Proc. of SPIE, vol. 5941, 594111 (2005).
6. A. C. P. Rocha, L. H. C. Andrade, S. M. Lima, A. M. Farias, A. C. Bento, M. L. Baesso, Y. Guyot, and G. Boulon, “Tunable Color Temperature of Ce^{3+}/Eu^{2+} , $3+$ Co-doped Low Silica Aluminosilicate Glasses for White Lighting,” *Opt. Express*, **20** [9] 10034-41 (2012).
7. S. C. Allen and A. J. Steckl, “A Nearly Ideal Phosphor-Converted White Light-Emitting Diode,” *Appl. Phys. Lett.*, **92** 143309 (2008).
8. L. Pang, Y. Shen, K. Tetz, and Y. Fainman, “PMMA Quantum Dots Composites Fabricated via Use of Pre-polymerization,” *Opt. Express*, **13** [1] 44-49 (2005).
9. C. Woelfle and R. O. Claus, “Transparent and Flexible Quantum Dot-Polymer Composites Using an Ionic Liquid as Compatible Polymerization Medium,” *Nanotechnology*, **18** 025402 (2007).
10. W. K. Bae, J. Kwak, J. Lim, D. Lee, M. K. Nam, K. Char, C. Lee, and S. Lee, “Multicolored Light-Emitting Diodes Based on All-Quantum-Dot Multilayer Films Using Layer-by-Layer Assembly Method,” *Nano Lett.*, **10** 2368-73 (2010).
11. E. P. Jang, W. S. Song, K. H. Lee, and H. Yang, “Preparation of a Photo-Degradation-Resistant Quantum Dot-Polymer Composite Plate for Use in the Fabrication of a High-Stability White-Light-Emitting Diode,” *Nanotechnology*, **24** 045607 (2013).

●● 김진명



- 2010년 서울대학교 재료공학부 학사
- 2012년 서울대학교 재료공학부 석사
- 2012년-현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 연구원

●● 이재욱



- 1994년 KAIST 전자재료공학과 학사
- 1996년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 2004년 서울대학교 재료공학부 박사
- 1996년-1998년 삼성전관 연구원
- 2004년-현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임연구원
- 2010년-2011년 미국 오크리지연구소 (ORNL) 방문연구원

●● 박영조



- 1994년 서울대학교 무기재료공학과 학사
- 1996년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 2000년 동경대학교 재료학과 박사
- 2001년-2003년 Oak Ridge National Lab. (USA), Post-doc
- 2003년-현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 책임연구원