백색 LED 및 Solid State Lighting 기술

DOI: 10.3938/PhiT.23.052

유 영 문

The White LED and Solid-state Lighting Technology

Young Moon YU

In this paper, in celebration of the 2014 Nobel Prize in Physics for the invention of the blue LED, which allows a white-light source, the current status and the future prospects for white LEDs, solid-state lighting, and LED convergence technologies are reviewed. Principles, current manufacturing technologies, and future prospects for white LEDs, current technical challenges and future prospects for LED system lighting, and technical challenges concerning the agri- and aqua-culture, shipbuilding and marine plants, automotive IT, and medical applications in the area of LED convergence technology were discussed in detail.

서 론

우리나라 LED 전문가들과 오랜 과학기술적 친분 관계를 맺어온 일본의 아카사키 이사무 교수, 아마노 히로시 교수, 나카무라 슈지 교수가 2014년 노벨 물리학상 수상자로 선정되었다. 이번의 LED에 대한 노벨 물리학상 선정은 LED 분야에 종사하는 전문가들에게 큰 기쁨과 자부심, 21세기를 향한 희망을 가져다준 역사적 사건이 되었다.

수상자들이 노벨상을 받게 된 주요 업적은 “밝고 에너지 절약의 백색 광원을 가능하게 하는 효율 좋은 청색 LED 발명”으로 보고되었다.^[1] GaN LED 개발 초기에 발표된 대표적 업적들을 간략히 정리하면 다음과 같다. 우선 나고야 대학의 아

마노와 아카사키 교수 등의 연구 결과를 살펴보면, 1986년 높은 결정품질과 광학특성을 내도록 하는 AlN 버퍼층의 발명,^[2] 1988년과 1989년 Zn과 Mg을 이용한 p-도핑,^[3,4] 1991년 Si을 이용한 AlGaIn의 n-도핑,^[5] 1992년 AlGaIn/GaN 구조와 외부양자효율 1.5%의 개발^[6] 등이 있고, 당시 니치아(주)에서 연구원으로 근무하던 나카무라 교수는 1991년 GaN 버퍼의 개발,^[7] 1992년 열처리에서 의한 Mg acceptor의 활성화,^[8] 1992년 InGaIn 층에 대한 p-doping,^[9] 1993년 InGaIn/GaN과 InGaIn/AlGaIn을 이용한 이중접합 및 다중양자우물 구조의 개발,^[10] 1994년 InGaIn/AlGaIn 이중 이중접합 구조를 이용한 2.7%의 외부양자효율 개발^[11] 등이 있다.

2014년 노벨물리학상 수상자들의 기여로 인해 반도체에 의한 백색 광원은 물론 빛의 3원색(RGB)을 이용한 full color 응용의 solid state lighting 시대가 앞당겨 도래되었다. 수상자들

REFERENCES

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/.
- [2] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett. **48**, 353 (1986).
- [3] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda and Y. Ishii, J. Lumin. **40 & 41**, 121 (1988).
- [4] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L2112 (1989).
- [5] H. Murakami, T. Asahi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki and I. Akasaki, J. Crystal Growth **115**, 648 (1991).
- [6] I. Akasaki, H. Amano, K. Itoh, N. Koide and K. Manabe, Int. Phys. Conf. Ser. **129**, 851 (1992).
- [7] S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L1705 (1991); S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L1998 (1991).
- [8] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 1258 (1992); S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh and N. Iwasa, Jpn. J. Appl. Phys. **31**, L139 (1992).
- [9] S. Nakamura and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. **31**, L1457 (1992).
- [10] S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L8 (1993); S. Nakamura *et al.*, J. Appl. Phys. **74**, 3911 (1993).
- [11] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, Appl. Phys. Lett. **64**, 1687 (1994).

저자약력

유영문 교수는 고려대학교(재료공학과)에서 박사학위를 취득하였으며, 2010년부터 현재까지 부경대학교 LED-해양융합기술연구센터 센터장과 과학기술전문대학원 LED융합공학 전공주임으로 근무하고 있다. 한국화학연구원 책임연구원, 일본 도호쿠대학 금속재료연구소 객원연구원, 한국광기술원 LED사업단장, LED-반도체조명학회 회장을 역임하였다. (ymyu@pknu.ac.kr)

Fig. 1. (upper) Historical evolution of the performance (lm/W) of commercial red, green, blue and phosphor-converted white LEDs. (lower) Historical evolution of the performance (lm/package) and cost (\$/lm) for commercially available red and phosphor-converted (PC) white LEDs. Reproduced with permission.^[12]

의 기여로 청색 LED의 실용화 가능성이 확인된 이후 세계 각국에서 상용화를 위한 연구개발 투자와 특허, 표준 경쟁이 촉발되었고, 그 결과 그림 1에 보이는 바와 같이 GaN 기반의 청색 LED를 비롯한 RGB 및 백색 LED의 성능과 가격에 있어 비약적인 발전이 이루어졌다.^[12] 청색 LED 효율이 향상되면서 황색 형광체를 이용한 백색 LED가 개발되어 휴대전화, LCD Back Light 시장에 상용화되었고, 녹·황·적색 형광체를 활용한 고연색성, 온백색(warm white)의 백색 LED가 개발되어 일반 조명 영역에서 주류의 위치를 점유해가고 있다. 2014년 3월 Cree사는 실험실 수준에서 303 lm/W의 효율을 실현했다고 발표했으며,^[13] Philips는 150~200 lm/W 효율의 상업용 LED 형광등을 개발하였다.

이러한 발전에도 불구하고 LED 광소자 자체에 대한 과학기술과 LED를 이용한 조명기술, 융합과학기술, 새로운 시장의 창조는 아직도 긴 여정이 남아 있다. 현재 LED는 조명의 영역에 진입을 시작한 초기 단계이기 때문에 조명 분야에서 요구하는 조건에 충분히 대응하지 못하고 있는 분야가 남아 있으며, 반도체 소자만의 장점을 활용하여 기존 조명광원들로는 실현할 수 없었던 새로운 응용과학기술을 창조해야 할 과제가 남아 있다. 인간의 생활과 활동을 지원하는 조명 이외에도 LED는 인류의 중요 과제로 남아있는 여러 가지 문제, 예를 들면 건강, 식량, 안전, 에너지, 삶의 품질, 환경 등의 문제를 해결하는데 기여하는 방향으로 나아가고 있다. 이를 위하여 RGB LED 이외에도 UV LED와 IR LED, 청록색, 앰버 등 특수 파장 LED의 개발이 필요하다. 또한 이미 개발된 LED를 활용하여 농생명, 수해양바이오, 의료, 해양·원자력·중화학 플랜트, 교통 및 수송기기, 정보가전, 정보통신, 군사과학, 여가 및 엔터테인먼트 등 다양한 영역에서의 융합 기술에 대한 관심이 크

Fig. 2. Schematic diagram for the principles of white LED preparation.

게 높아지고 있다.

본 기고에서는 청색 LED 발명에 대한 노벨상 수상을 맞이하여, 백색 LED와 solid state lighting 기술의 현황을 살펴보고, 향후의 LED 과학기술과 LED융합의 새로운 전개에 대해 전망해보고자 한다. 다만 여기에서는 LED 광소자 개발의 역사와 광소자 기술개발 및 기술 이슈 등에 대해서는 다루지 않으며, LED 조명기술과 융합기술, 시장 전망과 정부 정책 등에 대하여 고찰한다.

고연색성 고효율 백색 LED의 제조 기술

백색 LED의 제조 방법은 여러 가지가 있는데, 대표적인 방법을 그림 2에 요약하였다. 백색광원을 만드는 기본 원리는 가장 일반적인 방법으로 RGB 빛의 3원색을 혼합하거나, 보색 관계에 있는 색, 예를 들면 청색과 황색을 혼합하여 만드는 것이다. 그림 2(a)는 청색 LED에 황색 형광체를 사용하여 백색 광원이 만들어진다. 이 경우 녹색과 적색광의 강도는 약하므로 연색지수(color rendering index, CRI)가 낮아져 형광등 빛과 비슷한 냉백색(cool white)이 만들어진다. 설계 작업이나 전시, 색채 작업 등의 환경에서는 색의 재현성이 좋은 광원이 필요하다. 연색성 지수를 높이기 위하여 그림 2(b)와 2(c)와 같이 적색과 녹색

REFERENCES

- [12] J. Y. Tsao, M. H. Crawford, M. E. Coltrin, A. J. Fischer, D. D. Koleske, G. S. Subramania, G. T. Wang, J. J. Wierer and R. F. Karlicek Jr., Adv. Opt. Mater. **2**, 809 (2014).
- [13] <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>.

Fig. 3. Trend of commercial and R&D performance of white LED.

형광체를 황색 형광체와 함께 사용하는 기술이 개발되었으며, 이 경우 적색광과 녹색광의 강도가 높아진 분광스펙트럼이 만들어지므로 CRI가 90 이상으로 향상될 수 있게 된다. 조명용 광원의 상관색온도(correlated color temperature, CCT) 또한 중요한데, 이는 Planckian locus를 따라 높은 온도의 백색에서는 차가운 느낌, 낮은 온도에서는 따뜻한 느낌을 주는 조명 환경이 만들어지기 때문이다. 높은 효율, 높은 CRI, 낮은 CCT를 제조하는 경우 고효율 청색 LED는 물론 녹·황·적색 형광체, 형광체 조합, 분산 등의 기술이 패키징 공정에서 사용된다. 형광체를 사용하는 백색 LED는 기존 조명을 대체하기 위한 목적으로 색 제어를 할 필요가 없는 경우에 사용되고 있다.

형광체를 사용하는 기술은 광색이 고정되어 색변화 제어를 할 수 없게 된다. 따라서 색변화를 요구하는 경우에는 그림 2(e)와 같이 RGB LED를 구성하여 백색을 재현할 수 있으며, 1600만개의 색 재현을 해낼 수 있는 장점이 있어서 전광판, 건축조명, 미디어파사드, 광고 간판, 경관 조명 등에서 사용되고 있다. 적색 형광체를 구할 수 없거나 효율이 낮아 사용하기 어려운 경우에는 그림 2(d)와 같이 적색 LED를 사용하는 경우도 있다. 그림 2(f)는 405 nm의 UV LED를 사용하고 RGB 형광체를 사용하여 백색 광원을 제조하는 경우로서 고연색성이 필요한 경우에 해당한다.

백색 LED 성능 변천을 그림 3에 요약하여 나타내었다. 2014년 미국 DOE 발표에 의하면 백색 LED 로드맵은 냉백색의 경우 2013년 166 lm/W로부터 2020년 231 lm/W, 온백색의 경우 135 lm/W로부터 225 lm/W의 상용화를 제시하고 있다.^[14] 현재 미국 Cree사와 Philips Lumileds가 150~200 lm/W의 패키지를 생산하며, 오스람옵토와 필립스 루미레즈는 조명제품에서 최대 200 lm/W의 높은 성능을 보고하고 있고, 니치아는 150 lm/W급 고신뢰성 대면적 패키지를 상용화하고 있다. 우리나라는 130~180 lm/W를 생산하고 있으며, 중국은 GaN/Sapphire 구조의 경우 160 lm/W, GaN/Si의 경우는 130 lm/W(small chip의 경우 190 lm/W) 정도의 성능에 도달하여 우리나라를 위협하고 있다.^[15]

일반조명 분야에서의 LED의 기술적 과제 및 전망

조명이란 광(光)을 시환경 확보(물체와 그 주변을 잘 보이도록 광을 비추는 것)와 공간 이미지 형성(사람의 감정, 기분, 작용하도록 분위기 조성)을 통해 사람의 생활과 활동에 이용할 것을 목적으로 인공 광원을 이용하는 것을 말한다. 조명기술은 사람의 시각 능력을 증강시켜 시각 정보를 잘 획득하도록 하는 기술이며, 빛에 의해 사람의 심리, 생리, 의료적 특성이 작용하므로 사람의 생활, 활동과 관련된 안전과 쾌적한 생활을 영위할 수 있도록 빛을 이용하는 기술이다. 조명 환경에 따라 사람의 피로도와 작업 능률이 달라지며, 나이·성별·작업 강도에 따라 조명조건이 달라지고, 안전사고나 범죄 발생에도 영향을 미친다. 좋은 조명을 형성하기 위한 조건으로 실내 조명인 경우에는 (1) 적절한 조도(권장 조도) 또는 휘도, (2) 휘도 분포, (3) 휘도 대비, (4) 광원의 색온도와 연색성, (5) 음영, (6) 불쾌·불능·반사 글레어(분부심) 방지, (7) 경제성, (8) 미적 효과 등이 있다. 옥외조명의 경우에는 이에 더하여 안전, 주변 환경과의 조화, 조명 장소별 조명 요건 등이 추가된다. 좋은 조명 조건을 만들어 내기 위하여 LED기술은 단순 광소자로부터, 조명 기구, 제어통신, 설치, 운영관리 등의 기술과 결합되어 LED조명 시스템으로 재탄생하게 된다. 따라서 다음과 같은 기술적 과제가 LED 조명 응용의 영역에서 나타나고 있다.

- (1) LED 소자의 고효율화 기술, 저가격화 기술, 고신뢰성화(긴 수명, 사용 환경 적합성) 기술, 고출력화에 따른 방열 기술, 배광 제어를 위한 광학기술, 등기구화를 위한 표준 모듈화(광학엔진) 기술 등
- (2) 조명기구에서 조명 설계(조명목적 및 기준 설계, 조도/휘도, 글레어 제어, 배광, 균제도, 연색성 등) 기술, 이차 광학부품 설계 기술, 방열 재료 및 설계 기술, 기구 재료 및 설계 기술, 조명기구의 특성 및 신뢰성(수명, 광학·광도, 전기안전, 전자파 적합성, 환경 내구성) 평가 기술, 조명기구 경량화 기술, 시제품 및 양산 제조 공정 기술 등
- (3) 전원 및 제어통신에서 전원·회로 설계 기술, Zigbee PLC Blue Tooth 기술, 센싱 기술, 정보통신 기술, 조명 장소 및 조명 목적별 조명디자인 및 제어 콘텐츠 기술, 능동디밍 및 입력정보 분석에 따른 LED-ICT 융합 시스템 연동 제어 기술, 각 부품 및 시스템 제조 및 신뢰성 평가 기술 등
- (4) 그밖에 조명제품 보급을 위한 외적 환경으로서 국내외 표

REFERENCES

- [14] DOE, Multi-Year Program Plan 2014, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf.
- [15] Jianlin Cao, "Open Innovation Integration", China SSL 2014, Guangzhou Convention Center, 6, Nov. (2014).

Fig. 4. Paradigm change of lighting.

Fig. 5. Global commercial lighting revenue forecast, 2013-2020.^[14,16]

준, 국내의 인증, 보급을 위한 현장 신뢰성 실증, 고장분석, 빗공해 방지법에 따른 설계, 설치환경 및 설치 공사 기술, 노화·오염 대처 등 유지관리 등이 있다.

조명은 각 국가별로 문화역사적 배경에 따라 조명문화가 다르고 유통 경로, 전력 및 설치 방법, 조명에 대한 정부 정책과 국가 표준 등이 다르다. 또한 주문자가 요구하는 조명 환경에 맞추어 조명제품이 설치되는 경우도 많으므로 고객 요구사항 등 LED조명 제품 개발과 시장 개척에 있어서 많은 고려사항이 존재한다.

조명의 패러다임은 그림 4에 나타난 바와 같이 천연재료를 태워 빛을 얻었던 1세대, 전구의 2세대, 방전램프의 3세대를 거쳐 4세대인 LED 조명으로 변천해왔다. 향후 조명시장에서 각 광원별 시장점유율 전망은 그림 5와 같다.^[14,16] 현재 LED 전구의 개발로 인해 저효율 조명인 백열전구는 사용 및 제조의 금지가 전 세계적으로 확산되고 있으며, LED전구로 전량 대체되고 있다. LED형광등은 2012년부터 시장에 진입하여 현

Fig. 6. Example of LED system lighting.

재 가장 활발하게 대체되고 있는 제품이다. 2015년경부터 LED형광등이 조명 수요의 주류를 이루면서 2019년경 포화에 이르기까지 제품의 저가격화와 수요 수량의 급성장 등 LED산업의 주요 동력이 될 것으로 전망된다. 그러나 중장기적인 관점에서 볼 때 기존 조명의 대체를 목적으로 탄생한 LED전구, 형광등 등의 조명기구는 2018년경부터 LED 고유의 장점을 극대화한 LED시스템조명으로 재탄생하게 될 전망이다.

LED 시스템조명은 ICT와 LED조명이 융합되어 지능형, 스마트 기능을 갖는 조명으로 다수의 조명을 조명컨텐츠에 따라 디지털 제어 및 동작시키는 조명으로서 기존의 조명 광원으로 는 실현할 수 없는 조명환경을 제공하는 능동형 조명 시스템을 의미한다. 태양이 만드는 조명환경을 실내에 재현하여 교육, 주거 공간 등에서 인간의 건강과 생활 패턴에 맞게 스스로 구동하는 LED시스템조명의 사례를 그림 6에 나타내었다. 인간에게 적, 녹, 청의 파장을 인식하는 원추세포가 있어서 눈으로 입사되는 파장의 강도에 따라 빛을 인식하므로 눈을 향해 빛이 직접 조사되는 디스플레이 응용에서는 빛의 3원색인 R, G, B LED로 총천연색을 구현할 수 있으나, 물체에 빛이 조사되는 조명의 경우에는 물체의 색은 광원이 가진 스펙트럼에 의존하여 달라지므로 태양광 하에서와는 다른 분포의 파장을 방 사할 수 있으며, 따라서 인공 광원의 조건은 태양광 스펙트럼에 가까운 것이 바람직하다.

그림 6의 LED시스템조명은 태양광 스펙트럼의 재현 능력을 보유한 LED광학엔진을 이용하여 태양에 의해 조성되는 야외의 빛환경을 주거 공간 내에서 재현하거나, 주거공간의 각 공간별 조명 목적과 주거인의 생·연령·작업/행위에 따라 적합한 조명 환경을 제공하거나, 각 교과목별 특성에 맞추어 집중 또는 교

REFERENCES

- [16] Energy efficient lighting for commercial market, prepared by Navigant Research, 2Q (2013).

Fig. 7. Example of LED system lighting.

육 효과가 높아지도록 하는 조명환경을 능동적으로 제공한다. 이를 위해 태양광의 시간대별 빛환경을 센싱, 실내 공간의 위치별 조도 센싱, 사람의 위치와 이동 상황을 센싱하고, 실내 공간별 조명목적과 주 이용자의 주요 작업/행위, 선호하는 빛환경 취향 등의 정보를 입력하면 조명시스템의 제어 장치가 이를 분석하여 요구되는 패턴의 조명 콘텐츠에 따라 자동 또는 반자동으로 다수의 LED조명엔진이 작동하도록 하는 것이다. 조명 시스템은 원격 조명제어, 원격 의료정보통신, 원격 모니터링 등의 목적을 위해 필요한 경우 유비쿼터스 제어망과 연결되거나 전력의 효율적 이용을 위해 스마트 그리드와 연결될 수 있다. LED시스템조명의 핵심 기술은 LED광학엔진의 성능, 공간 및 이용자 라이프 스타일 특성에 맞는 조명콘텐츠, 관련 정보를 센싱하고 분석하여 조명 목적에 따라 다수의 광학엔진을 동작시키는 ICT 제어시스템 등이다. 그림 7에 사용자 라이프스타일에 따른 맞춤형 침실조명 콘텐츠의 예시를 나타내었다.

LED 도로조명 시스템의 경우, 가로등을 네트워크로 연결하고, 주광 센싱, 이동 센싱, 속도와 방향 센싱, 광량 센싱, 자기 진단 센싱 등으로 정보를 실시간 분석하고, 작동 상태·고장예측 등의 정보를 중앙제어실에 전송하여 원격제어 및 유지 관리하는 시스템이 개발 중이다. 사무 공간, 창고 등에서의 조명 시스템은 재실감지 기능으로 에너지절감 극대화, 상점 조명 시스템은 날씨에 따른 조명 제어와 전시물품의 종류에 따른 색 온도 제어 등이 개발되고 있다.

향후 일반조명 분야에서는 LED의 시스템 조명화가 주류로 부상하면서 (1) LED 광학엔진의 고효율화, 고기능화, 저가격화, 고신뢰성화, (2) 인간의 감성과 조명 요구 조건에 관한 이해를 바탕으로 다양한 종류의 공간별, 사용자의 성별·나이별·작업/행위별 조명조건을 만족시킬 수 있는 표준화된 시스템(각종 센싱, 능동 디밍, 배광제어, 색온도 및 광색 제어, 통신제어 등), (3) 조명용 부품소재와 통신 방식의 표준화, (4) 다양한 종류의 조명 콘텐츠 어플리케이션 개발 등이 요구되고 있다.

융합 분야에서의 LED의 기술적 과제 및 전망

LED조명은 사물에 빛을 조사하여 사람의 주거 생활과 야간 활동에 이용하는 것을 목적으로 하는 반면, LED융합은 동식물

Fig. 8. Present and emerging market of LED lighting and convergence technology.

을 대상으로 하거나 공산품 등 제조물에 사용되어 인간에게 편익을 주는 발광장치 및 시스템으로 LED 과학기술과 타 분야 과학기술이 융합하여 새롭게 창조된 신기술로 정의할 수 있다. LED융합의 범주에는 그림 8에서 보는 바와 같이 수송기기(해양조선, 자동차, 항공, 철도 등), architainment(건축조명, 미디어파사드, 공연조명), 농생명(식물생장, 동물제어, 해충방제), 해양(해양엔지니어링, 수해양생물생산, 항만/도시조명, 수해양 환경 등), 의료(테라피, 진단, 치료 등), 가시광통신(신호, 정보 등), 군사과학(병영조명, 합정조명, 계측 등) 등 다양한 융합 분야가 존재한다.

그림 9에 LED산업의 공급체인을 나타내었다. 그림 8과 9에서 휴대전화, LCD back light, 건설 분야 일반조명, 도로조명, 사인 등의 응용은 현재 우리나라 LED산업에서 주력 시장을 형성하고 있는 분야이며, 자동차, 조선해양과 LED융합 분야는 유망성과 미래성장성을 보유하고 있는 신산업 분야이다. 우리나라의 주력 산업인 휴대전화, LCD용 LED back light 시장이 포화됨에 따라 LED조명 시장이 주력 시장으로 떠오르고 있지만, 지난 3년간 우리나라 정부정책이 LED조명 분야를 중소기업 적합업종으로 규정함에 따라 LED산업이 성장동력을 잃고 LED조명 분야 기술경쟁력이 정체상태에 빠짐으로써 중국 등과의 기술 격차가 크게 좁혀진 상태에 있다. 이에 비해 LED융합은 새로운 과학기술을 창조하는 기술개발 및 시장 진입 초기 단계를 진행하고 있다.

LED융합 분야에는 많은 다양성이 존재하지만 가장 빨리 부상하고 있는 분야는 국가 산업육성 정책에 따라 부양되고 있는 (1) 조선해양, 수산 등 바다와 관련되는 LED-해양 융합기술, (2) LED 식물공장 등 LED-농생명 융합기술, (3) 지능형 전조등 등 LED-IT 융합기술이며, (4) LED-의료 융합 기술, (5) UV LED를 이용하는 LED-환경 융합기술, (6) LED-국방 융합 기술, (7) LED-MICE관광 융합기술, (8) LED-한방 약학

Fig. 9. Supply chain of LED industry.

기술, (9) LED-가시광통신 융합 기술 등이 지금부터 서서히 싹을 내리면서 2020년경 시장성장기에 도달할 것으로 전망된다.

융합기술은 두 개의 독립적인 과학기술 분야의 기술이 화학적으로 융합하여 새로운 과학기술을 창조하는 특성을 가지는 기술이므로, LED융합기술은 융합하고자 하는 대상 분야의 과학기술에 정통한 지식과 기술을 겸비해야 하는 어려움을 극복해야 한다. 예를 들면, LED-해양과 LED-농생명 융합 분야는 농업 및 수산업, 생물생태학, 식물학, 축산업, 어업과 양식, 조선과 해양 플랜트 등의 과학기술을 흡수 융합하여야 하고, LED-의료 융합 분야는 피부과, 안과, 치과, 내과, 신경과 등의 의료과학 기술과 융합하여야 신제품의 개발과 시장 진입이 가능해진다.

현재 LED-농생명 융합 분야는 친환경 농산물 및 종자 개량, 식품 기능성 및 안정성 원료 생산, 의약품 소재 생산에 LED를 응용하는 융합기술 창조를 목적으로 농업, 축산업, 분자농업 등의 기술 분야와 융합을 추진하고 있다. 무농약, 저세균, 무세척의 식재료 생산, 종자 산업, 미네랄, 비타민 등의 영양강화 작물, 해충방제 등의 시장에 선진입하고, 한약재 및 식품 등 고기능성 작물 생산, 유용미생물 응용, 경구백신 단백질 의약품 등을 중장기적으로 산업화하는 방향으로 연구개발이 진행 중이다.^[17] 육상 식물은 지구의 역사 속에서 태양광과 기후에 적응하여 진화해왔으며, 광합성을 통해 탄소화합물을 합성하여 지상의 동물에게 영양을 제공한다. 식물에서 빛의 역할은 광합성을 위한 에너지원이며, 형태형성을 위한 신호로 작용한다. 빛과 엽록소의 명반응에 의해 빛에너지를 화학에너지(NADPH₂, ATP)로 변환하며, 암반응에 의해 생성된 화합물을 포도당으로 합성한다. 빛은 식물의 꽃봉오리 발현, 성장, 개화 시간, 식물형태 등을 제어하므로, LED-농생명 융합기술은 LED 식물공장을 통해 작물재배에 필수적인 빛, 수분, 영양분, 온도 등의 요소를 인공적으로 공급하여 신선, 안전, 고영양 식물을 수확하는 첨단 농업기술이다. 식물공장의 핵심기술은 작물생장에 필요한 양분의 함량 조절과 양분 공급의 자동 제어 기술, 온·습도 자동제어 기술, LED조명 설계와 적절한 스펙트럼의 빛의 조사, 병충해로부터의 보호 환경 제공 등이다. LED

Fig. 10. Phototherapy dependence on wavelength in skin disease.^[20]

식물공장은 잎들개·국화·딸기 등의 전조 재배, 장미·양란류의 시설화훼 보광 재배, 멜론·파프리카·고추 등의 품질향상을 위한 시설 과채류 보광 재배, 상추·청경자 등 쌈채류의 시설 엽채류 친환경 재배, 포도·복숭아·열대과수·노지밀감·사과·배 등의 과수 생산성 증대 및 품질향상, 인삼 등의 약용작물 기능성 증진 및 수량 증대, 유채·참깨·콩 등 노지작물의 생산성 증대 및 품질 향상, 화훼류의 생육 조절 등 많은 분야에서 성과를 거두고 있다.

LED-자동차 융합조명은 수동형 안전편의, 진보된 안전 운전, 충돌 방지, 운전 자동화 등을 목적으로 빛을 통한 지능형 자동차를 탐구한다. 자동차는 감성(emotional), 미(aesthetic), 기능(functional)이 향후의 트렌드이다.^[18] 따라서 LED광원의 성능향상과 함께 자동차와 사람이 교감할 수 있는 인지과학적 감성조명, 차체 디자인과 조화를 이루는 매력적인 스타일의 LED조명 기구, 사용자의 편의성·시인성·안전성을 극대화한 차별화된 지능형 LED조명 시스템이 필요하다. 이를 위하여 자동차 전용의 기능성 LED광원, 광학, 방열, 제어, 센싱 및 인식을 위한 IT 기술이 LED-자동차 융합 조명시스템의 핵심 기술이다. 현재 차내 감성을 위한 LED조명 기술로서 움직이는 빛을 통한 감성 전달, 순차 점등, 고품격 점등 이미지 형성 등 리어램프의 디자인을 통한 감성의 차별화, LED램프 적용을 통한 자동차 조명의 구조 슬림화, 기능 통합·단순화, 독창적인 조명기구 디자인으로 자동차 외관의 미적 차별화 개발이 진행 중이다. 또한 LED램프의 ADB(Adaptive Driving Beam), matrix lamp, AFS(Adaptive Front Lighting System) 등의 기술을 통해 도로 및 주행환경 인지, 주행환경과의 통신, 충돌 방지 등의 지능형 LED램프를 구현하고자 하는 노력이 확대되고 있다.

LED-의료/헬스 융합조명 분야에서는 광의료 치료기기, 광의료 진단기기, 광융합 의료기기 등으로 많은 연구개발과 실용화가 이루어지고 있다. 개발된 LED의료기기로는 내시경용 카메

REFERENCES

- [17] C. H. Hong, "Current Status on LED-Agrbio Convergence Technology", Seminar on LED Convergence Technology, Conference Hall of The Korean Federation of Science and Technology Societies, 14th Nov. (2014).
- [18] C. G. Kang, "Automotive LED Lighting Technology and its Market Prospect", LED Forum, Chunma Arts Center (60th Anniversary Hall) at Youngnam University, 29th Oct. (2014).

Table 1. Reliability requirements of LED-Marine convergence products.^[21]

항목	방염, 방습	방풍, 방진(振)	방수, 방진(塵)	방유, 방폭	EMS	내고수압	내극저온
해양 환경	부식 가속화	내충격, 진동 노화	수분, 분진	유적, 폭발, 화재	항해안전	> 300기압	-89.6~36℃
신뢰성 시험	염수분무, 항온 항습, 고온고습, 온도사이클	구조안전, 진동, 파괴강도	IP등급	방폭	전자파내성	내고수압	극저온

라 조명, 수술용 고글과 무영등 조명, 병원과 의료복지 병실용 환자 쾌유 빛환경 조명, 수면 therapy, 광 therapy, 신생아 황달 치료기, 통증치료기 등이 있다. 치과 분야에서는 치과용 무영등과 LED조명을 부착한 핸드피스, 광중합기, 구강 카메라 광원, 치아미백기, 치아색조 감별기, 치과용 LED라이트 미러, 치아우식 진단장치, 하악운동 측정기 등이 개발되어 특허 등록되었다. 피부과 분야에서는 1903년 Niels Ryberg Finsen^[19]이 탄소아크램프를 이용하여 낭창 등 피부병 치료법을 개발한 공로로 노벨 의학상을 받아 phototherapy의 유효성이 오래 전에 입증된 바 있다. 인간의 피부에 대한 빛의 침투는 870 nm를 최대 침투깊이로 하여 810, 870 nm 파장은 하피층(hypodermis)까지 깊이 침투하며, 그 후 단파장과 장파장이 될수록 침투깊이가 감소하여 590, 630, 660, 970 nm는 진피층(dermis)까지, 300 nm와 400 nm는 표피층(epidermis)까지 침투한다. 그림 10에 LED파장별 피부병 치료법과의 관계를 나타내었다. 현재 피부과 및 정신과 분야에서는 정신장애, 기분장애, 생리장애, 빛결핍장애, 우울증, 거동장애, 인지장애, 탈모치료, 비듬, 지루성 피부염, 어루러기, 여드름, 아토피, 피부노화 치료, 피부 기저세포암, 광선각화증, Extramammary Paget's disease(EMPD) 등의 치료를 위한 LED 광치료기기, 피부미용 분야에서는 검버섯, 눈보호 및 눈주름 개선용 광치료기 등이 개발되어 특허 등록되었다. 빛은 박테리아, 곰팡이류에 대한 살균효과가 있고 면역조절 효과가 있어 백반증, 아토피, 포도당 검출기 등이 개발 중에 있으며, UV LED가 개발되는 경우 LED살균 시스템 등으로 살균, 소독 분야에 많은 신제품들이 나올 것으로 예견되어 이에 대한 많은 투자가 이루어지고 있다.

LED-해양 융합기술은 “바다환경에서 LED를 사용할 때 발생할 수 있는 제반의 문제들을 해결하기 위한 과학기술”로 정의된다.^[21] 바다환경에서 LED를 사용한다는 것은 바다의 영향이 미치는 지역 내에서의 LED응용을 의미하며, 海上, 海中, 海邊의 3가지 환경을 상정한다. 첫째로 해상에서는 일반 선박과 해양플랜트, LNG운반선, 크루즈선, 해군 함정과 같은 고부가가치 특수선박이 남극과 북극의 극저온 환경과 적도의 고온 지역을 운항하며, 항로표지 등 해상안전 시설물 등이 설치되어 있다. 둘째로 해중 환경에서는 수중생물의 포획·양식·재배, 수중작업과 해양설치물, 해양플랜트의 Subsea 시설 등이 있

며, 셋째로 해변에는 해양도시가 형성되어 바닷바람의 영향을 받는 주거·상업·산업단지, 항만부두, 해안도로 및 해양대교 등이 시설되어 있다. 따라서 이러한 해양환경에서 사용되는 LED 제품의 성능과 신뢰성이 LED-해양융합기술의 고려 대상이 된다. 바다는 바다에 적응하려는 인간에게 가혹한 환경을 부여한다. 따라서 해양으로 진출하기 위해서는 육상에서 획득된 LED 조명 및 LED융합 기술에 부가하여 바다가 요구하는 특성을 별도로 해결해야 한다. 해양환경이 요구하는 신뢰성 항목을 표 1에 정리하여 나타내었다.

현재 LED-해양 융합기술은 해양환경 부합 고신뢰성 제조에 필요한 과학기술을 중심으로 하여 조선해양 엔지니어링, 수해양 생물생산, 해양조명도시의 3개 방향으로 특화한 개발이 진행되고 있다. LED-해양융합 제품은 조도/휘도, 균제도, 눈부심 방지, 조명 콘텐츠와 ICT 제어 등 통상의 조명으로서 갖추어야 할 조건에 더하여 염수 부식과 진동 열화에 대한 높은 신뢰성 보유가 기본적인 설계 조건이며, 다음으로 사용 목적과 환경이 요구하는 특정한 성능과 긴 수명을 요구받고 있다. 예를 들면, 해양플랜트에서는 원유 채굴, 보관, 정제, 운반 등을 수행하므로 상시 또는 간헐적으로 화재·폭발 위험환경이 발생된다. 따라서 조명을 비롯한 모든 전기전자 제품은 어떠한 의도되지 않은 제품 고장 하에서도 점화원이 될 수 있는 불꽃이 발생되지 않아야 하며 기기 표면온도가 제한온도 이상의 고온으로 올라가지 않도록 설계·제작하는 방폭 설계기술이 필요하며, IECEx, ATEX 국제인증을 받아야 제품으로서 해양플랜트 시장에 진입될 수 있다. Zone 0·1·2의 위험장소 등급에 따라 조명 및 전기전자 기기의 보호 등급과 방폭 구조가 달라진다. 또 다른 예로서, 안전항해를 위해 선박의 자기 위치를 타선박에 알려주는 기능을 하는 항해등은 6해리(9.6 km)의 광달 거리를 확보해야 하며, 국제항로의 등대는 46 km의 원거리를

REFERENCES

- [19] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1903/index.html.
- [20] J. B. Lee, “Photo-therapy using LED (Current Status in Medical Application)”, the 8th Conference of LED · Solid State Lighting Society, Korea Polytechnic University, 13~14th Aug. (2013); <http://www.slssl.org/droom/130813/2/no.9/index.htm>.
- [21] Y. M. Yu, Journal of LEDs and Solid State Lighting 5(1), 1 (2013).

광신호로 전송해야 하는 등 해양에서는 2~50 km의 원광달거리 광전송 기술을 필요로 한다. 컨테이너 하역부두는 높이 30 m의 고공 조명탑이 설치되어 반경 100 m의 면적을 높은 균제도로 조명한다. 이러한 조명 제품들은 원광달거리 도달을 위한 프레넬렌즈 설계 등 고급 광학설계 및 제조 기술, 고광도 조명 광원 설계 기술을 추가로 요구한다. 크루즈 선박에는 객실, 식당, 공연장, 복도, 스포츠 등 13 종류 이상의 조명 공간이 존재하며, 각각의 공간에 따라 차별화된 조명 연출과 그에 따른 종합적인 조명기구가 필요하다.

2013년 세계 인구는 71억 명에 기아인구 8.7억 명이며, 2050년경 인구가 100억 명으로 증가하면서 20억 명 이상의 기아인구가 발생될 것으로 전망되어 세계 식량 위기가 높아지고 있다. 육상 농업에서의 식량 증산은 한계에 도달하여 해양에서의 식량 확보가 불가피해지고 있으나 어업에 의한 생산량 증대는 기대할 수 없는 상황이다. 따라서 어업에서 친환경 양식기술로 전환하여 양식을 통한 고단백 식품 확보 기술개발이 시급하다. 현재 일본에서는 LED의 색온도 제어로 사계절의 자연환경을 실내에 재현하여 어류의 호르몬을 조절하고 성숙속 촉진, 산란, 부화, 생육 촉진 등의 번식과 증식 기술을 개발하고 있으며, 자·치어의 바이러스 오염을 빛으로 감소시켜 생존률 향상과 건강한 어류 양식 기술을 개발하고 있다. 또한 조개, 해조류, 사람에게 피해를 주는 불가사리, 성게, 해파리 등의 유해·해적 생물을 LED파장을 이용하여 유인 제거하는 기술, 유용 성분을 다량 함유한 식품/의약품·사료·첨가제·바이오오일용 미세조류와 해조류의 대량생산 조명기술 개발 노력이 계속되고 있다. 의료 분야에서도 마찬가지로 경제성 있는 UV LED가 상용화되는 경우 수산과학 분야에서도 일대 혁신을 가져올 것으로 예견되고 있다.

21세기 중반에는 all solid state lighting city가 실현되게 될 것으로 예견된다. LED-해양 융합기술에서 도시조명 분야는 중장기적으로 해양환경에 부합하면서 고품격 도시로서의 좋은 빛환경을 조성하는 기술을 추구한다. 우리나라는 2013년부터 빛공해 방지법이 발효되었기 때문에 빛의 과다 사용과 오용을 억제하기 위해 서울, 부산, 광주에서 빛공해 영향 평가가 진행 중이다. 한편으로는 주거, 상업, 도로 주변에서의 조명을 쾌적하게 만들면서 주변 환경과 어울리는 랜드마크, 해안경관, 건축조명, 거리경관 등의 좋은 빛환경을 조성하기 위한 야간경관 기본계획이 각 도시별로 실행되고 있다. 빛의 오용과 과다 사용을 방지하여 나쁜 빛환경을 제거하고, 좋은 빛환경을 꾸준히 조성하는 노력을 통하여 고품격 빛의 도시가 실현될 것이며, 이를 뒷받침하는 기술로서 해양환경 부합 고신뢰성, 고성능의 LED-ICT 융합조명 기구와 시스템의 개발, 실증시험과 품

질보증(보급) 기술, 보급 표준과 표준 측정 등의 기술이 요구되고 있다.

맺는 글

아카사키 교수 등의 2014년 노벨물리학상 수상을 기념하여 백색 LED와 LED 일반조명, LED 융합조명의 기술 현황과 향후 전망을 고찰하였다. 20세기가 전자, 컴퓨터의 개발로 지식 기반 사회를 창조하였다면, 21세기는 전자의 기반 위에 LED를 비롯한 빛의 산업이 과학기술 혁신을 주도하는 빛의 세기가 될 것으로 전망되고 있다. 사람은 87%의 정보를 시각을 통해 얻고 있고, 생물학적으로 태양 빛에 영향을 받으며 진화해왔기 때문에 빛은 인간의 판단과 정서, 건강 등에 막대한 영향을 미치고 있다. 따라서 앞으로도 LED는 빛을 발생시키고 응용하는 산업을 통해 인류의 과학기술과 경제 성장에 주도적인 기여를 하게 될 것으로 생각된다.

기존 조명은 백색광이 대부분이므로 청색 LED와 황색 형광체를 이용하여 청색과 황색의 보색 관계를 이용한 백색 LED가 먼저 상용화되게 되었다. 그 후 태양빛과 유사한 광의 재현을 위하여 적색과 녹색 형광체의 사용량과 조성비에 따라 색온도 또한 조절하는 기술이 대두되어 차가운 청백색을 온백색으로 바꾸고, 연색지수를 97까지 높이는 백색 LED 조명이 구현되었다. 현재의 LED조명기술은 눈부심 방지, 후배광 형성 등 빛공해를 방지하는 조명기구 기술과 LED-ICT 융합을 통한 스마트 시스템 조명 기술을 향해 나아가고 있으며, all solid state lighting city 실현을 위한 기초를 다져 나가고 있다.

한편으로는 기존의 조명으로는 실현할 수 없었던 새로운 영역으로서 농생명, 해양조선, 해양수산, 환경, 의료, 군사과학, 정보가전, 가시광통신 등에서의 LED융합이 이질적인 학문 분야의 기술과 융합하면서 다음 시대를 여는 새로운 과학기술로 대두되고 있다. LED융합을 위해서는 고성능, 장수명을 가진 UV LED, 청녹색을 포함한 가시광 파장의 LED, IR LED 등의 다양한 광원의 개발이 요구된다. 또한 LED융합기술 창출을 위해서는 타 분야 기술의 적극적인 흡수·융합, 신기술 재창조를 위한 혁신적인 사고, 새로운 발상에 의한 융합기술 탐구가 적극적으로 권장되어야 할 것이라 생각된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업원천기술개발사업(프로젝트 번호 10037416)의 지원을 받아 수행된 연구임.