기술해설

식물공장(Plant Factory)용 광원기술

성열문〈경성대학교 전기공학과 교수〉

1. 서 론

21세기에 인류가 극복해나가야 할 대표적인 과제로서 에너지, 환경, 인구 및 식량 문제를 들 수 있다. 최근 주목받고 있는 식물공장(Plant Factory)은 이러한 지구촌 문제를 해결하는데 있어서 발전 가능성이 큰 분야중 하나이다[1]. 식물공장이란 야채나 기능성 식물을 주요 재배작물로 하는 생산시설 내에 광, 온도, 습도, CO_2 농도, 배양액 등을 인공적으로 제어, 공급함으로써 식물을 자동적으로 재배 생산하는 시스템이다. 식물공장은 낮에는 햇빛을 이용하는 태양광형 식물공장과 완전 제어형(인공광형) 식물공장으로 구분된다(그림 1). 특히 완전 제어형 식물공장은 외부 기후변화에 영향을 거의 받지 않고, 공간 활용률을 극대화함으로써 좁은 공간에서 대량생산이 가능하며, 고부가가치의 작물을 안정적으로 공급할 수 있다는 장점이 있어 많은 관심을 받아왔다[2]. 농업기술에 IT, 에너지, 바이오 등, 첨단기술이 융합된 미래형 산업으로써 기대되어 최근 정부차원에서도 실용화를 적극 장려하고 있다. 하지만 초기 설비투자비의 민간부담이 크고, 운영상 광원을 비롯한 재배환경 유지에 많은 전력소비가 발생되는 등, 아직 해결해야할 과제들이 남아있다. 무엇보다도 비용절감(Cost-effectiveness)을 실현하는 것이야말로 식물공장의 저변화를 위한 최대의 당면과제이다[3]. 이번 기술 해설에서는 최근 식물공장용 광원으로서 각광받고 있는 발광 다이오드(Light Emitting Diode; LED)와 차세대 광원으로서 기대되고 있는 레이저 다이오드(Laser Diodes; LD) 기술 그리고 이를 식물공장에 활용하는 방안들에 대해 소개한다.

(a) 태양광형 식물공장

(b) 인공광형 식물공장

그림 1. 식물공장(Plant Factory)

2. LED 광원

식물공장에서의 광원은 종래 나트륨 램프에서 형광등을 거쳐, 현재 발광 다이오드(LED)를 사용하기에 이르렀다. 이러한 광원기술을 바탕으로 최근의 완전 제어형 식물공장에서는 무농약이면서 신선한 고부가가치의 기능성 식물을 좁은 공간에서 대량으로 계획 생산할 수 있게 되었다. 특히 LED와 같은 반도체 소자의 적용은 높은 발광효율과 함께 전력 소모량을 줄일 수 있다. 게다가 우연의 일치라고 해야 할까, LED의 발광 스펙트럼(피크파장: 660nm)은 광합성 반응의 핵심 염료인 엽록소(Chlorophyll)의 흡수 피크(680nm)와 거의 일치하기 때문에, 냉음극형 형광램프(CCFL)와 같은 종래의 광원에 비해 광합성 효율에도 최적이다(그림 2 참조). 그 밖에도 장수명, 소형, 저전압 구동 그리고 펄스 조사가 가능한 점 등, 많은 장점들이 있기 때문에 LED는 식물공장의 주 광원으로서 시장을 주도할 것으로 전망된다[4].

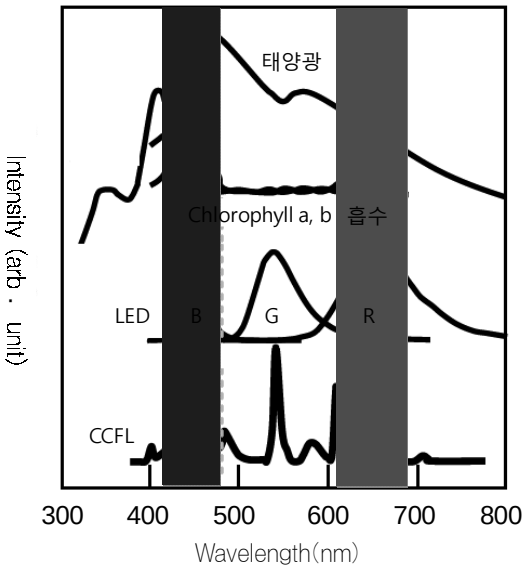

그림 2. 태양광의 지표면 발광분포와 엽록체의 흡수 스펙트럼 및 각종 광원의 발광 스펙트럼

LED는 반도체 재료의 밴드 갭을 제어함으로써 다양한 파장의 광을 구현할 수 있다(그림 3 참조). 각종 조명장치나 신호기, 표시기 등의 용도로서 사용되고 있고, 응용분야 또한 나날이 증가하고 있다. 가장 많이 사용되고 있는 것은 적색 LED(파장: 660nm)이며, 출력 7mW의 경우 시판 가격은 제품이나 지역에 따라 다소 차이가 있지만 대략 개당 100~300원대 정도이다. 그 외에도 백색, 청색(450nm, 470nm), 청록색(505nm), 녹색(525nm, 555nm), 황색(595nm), 등색(605nm) 등, 대략 7가지 색을 구현할 수 있다. 이들은 출력이 수 mW정도이며 가격은 개당 대략 500~1000원대이다. LED를 사용하여 다양한 파장의 광을 구현할 수 있게 되면서 식물성장을 위한 광원으로서 다양하게 활용할 수 있게 되었지만, 앞서 언급한 바와 같이, 식물공장에서는 많은 수의 LED 광원들이 요구되고 있으며, 이로 인해 많은 전력소비가 발생되고 있다. 더욱이 LED 자체의 발열 문제 또한 식물성장의 환경 제어에 영향을 미치게 된다. 향후 식물공장의 저변화를 위해서는 이러한 문제점들이 최우선적으로 개선되어야 할 것이다.

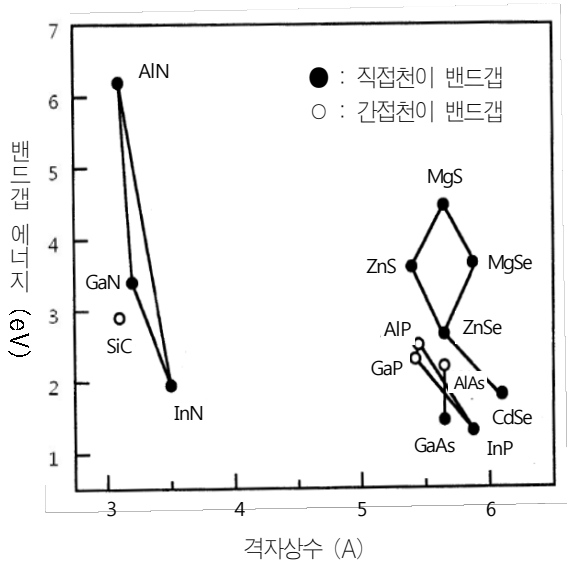

그림 3. 각종 반도체 재료의 격자상수와 밴드갭 에너지

식물공장의 청색광원에는 420~470nm의 LED가 적용되고 있다. 그림 4는 청록색 LED 광원의 대표적인 예로서, InGaN 기반의 B, G, Y 구현 SQW(Single Quantum Well) LED의 발광 스펙트럼을 나타낸다. 각각의 YGB 스펙트럼은 InGaN 양자우물(QW)의 In 조성비를 변화시켜 구현된다. 이와 같이 InGaN을 활성층으로 사용하게 되면 In 조성비만을 가변시켜 자외선에서 황색광의 LED 제작이 가능하다. 순방향 전류 20mA일 때, 청색 LED의 발광 스펙트럼의 피크 파장은 450nm, 반치폭은 30nm이며, 녹색 LED는 피크 파장 520nm, 반치 폭은 35nm이다. 발광출력은 순방향 전류 20mA일 때, 청색 LED는 5mW, 녹색 LED는 3mW이다. 피크 파장이 장파장일수록 발광출력은 감소한다. 이것은 In 조성비를 증가시키면 InGaN의 양자 우물층의 결정성이 저하되는 성질과 장벽층과 우물층 간의 격자 불균일 및 열 확장계수 차에 따른 저항성분이 증가하기 때문인 것으로 해석된다. 발광강도는 녹색 LED에서 7cd 이상이며, 외부 양자효율은 7% 이상이다[5].

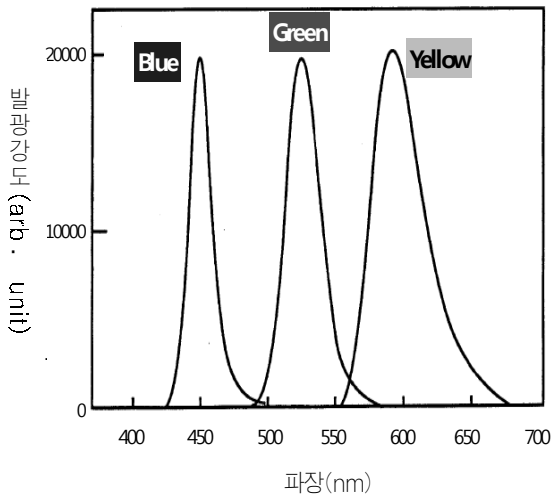

그림 4. InGaN 기반의 SQW LED의 Y, G, B 발광 스펙트럼

3. LD 광원

반도체 레이저를 활용한 레이저 다이오드(Laser Diodes; LD)를 식물공장용 광원으로서 활용하는 방안이 주목을 받고 있다. LD는 LED에 비해 가격이 비싸지만, 고출력, 고효율의 장점이 있다. 특히 고밀도 광디스크인 DVD(Digital Video Disc)의 광원으로써 널리 보급되면서 향후 코스트 다운이 기대되고 있다. 근래 들어와서 적색과 청색의 LD개발이 진척되었고, 특히 적색 LD의 신뢰성 향상과 저 가격화가 급속히 진행되어 왔다. 통상 광 디스크의 기록밀도는 레이저 광의 발진파장의 역수의 제곱에 비례하여, 발진파장이 반으로 감소하면 기록밀도는 약 4배로 증가한다. 파장이 짧을수록 기록밀도는 증가하고, 파장이 짧을수록 레이저 프린터의 분해능도 높아지게 된다. 따라서 그동안 업계에서는 LD의 발진파장을 줄이는 방향으로 기술개발을 진행해 왔다. 그림 5에 각종 LED 및 반도체 레이저(LD)를 나타내었다.

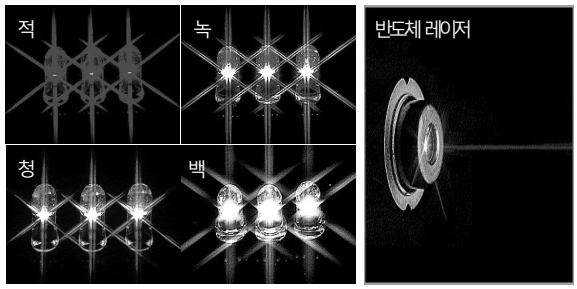

그림 5. 각종 LED 및 반도체 레이저

단파장 레이저의 핵심 재료로서 그동안 ZnSe계가 주로 연구되어 왔다. 현재 발진파장은 515nm이고, 상온 연속발진(CW) 조건에서의 수명은 100여시간 정도로 비교적 장수명에 해당되나, 아직 실용화까지는 진행되지 못하고 있다. GaN계의 경우, 1995년에 처음으로 최단 파장인 420nm의 청자색 LD가 개발되었고, 상온 CW에서 35시간의 수명이 보고되었다.

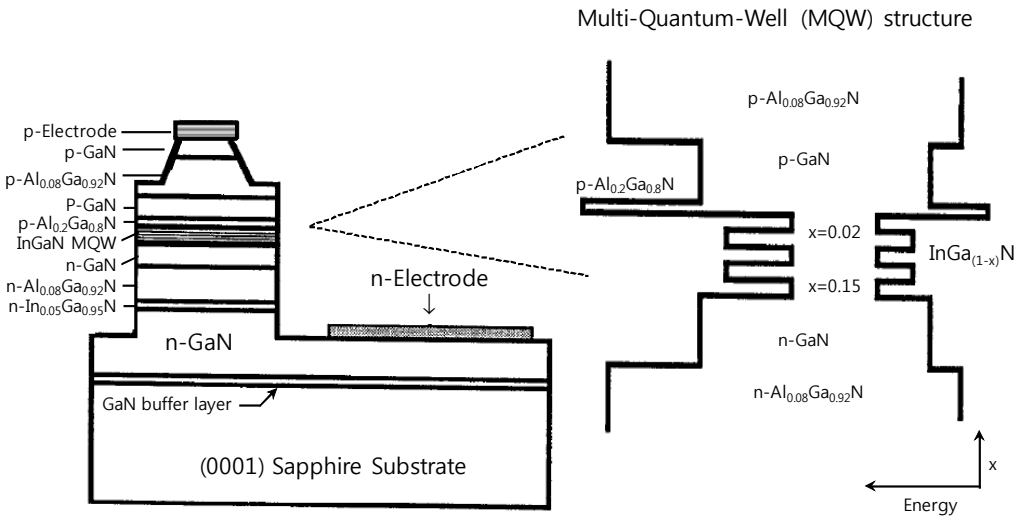

그림 6. 청자색 InGaN MQW LD의 구조

향후 식물공장용 청색광원으로서 420~470nm의 저가이면서 장수명의 청색 LD가 요구된다. 현시점에서는 가격이 저렴한 GaN계 LD가 식물공장용 청색광원으로서 가장 기대되고 있다.

한편 적색(650nm, 660nm) LD의 경우 현재 가장 많이 보급되고 있으며, 출력 100mW의 경우 시판가격은 제품이나 지역에 따라 다소 차이는 있으나 개략적으로 개당 5000~10000원 선이다. 앞으로 DVD의 보급이 확대되면 적색 LD의 가격 또한 계속 내려갈 것으로 전망되며, 머지않아 단위 출력 당 가격이 적색 LED와 비슷한 수준으로 떨어질 것으로 예측된다. 현재 적색 LED의 발광효율은 약 30%이며, 적색 LD의 발광효율을 60%로 간주하면, 고효율이라는 점에서 향후 적색 LD가 식물공장의 광원으로써 보편화될 것이다. 더욱이 680nm의 적색 LD도 개발되어 있다. 식물공장에서는 성장촉진의 관점에서 적색과 청색이 필요하다. 청색 LD(405nm, 440nm)의 가격이 현시점에서는 너무 비싸므로 식물공장 용도로서의 사용은 시기상조이지만, 앞으로 기술개발을 통한 활용 가능성은 충분히 있다[6].

그림 6은 LD의 대표적인 기술개발 사례로서 상온 CW 발진에서 청자색의 InGaN MQW(Multiple Quantum Well) LD의 구조를 나타낸다. 전체 구조를 보면, C면 사파이어 기판을 사용하여 그 위에 GaN Buffer층, n-GaN Conductor층, n-$In_{0.05}Ga_{0.95}N$ Crack방지층, n-$Al_{0.08}Ga_{0.92}N$ Clad층, n-GaN Guide층, Si-dope 350nm 두께의 $In_{0.15}Ga_{0.85}N$ QW층, Si-dope 700nm 두께의 $In_{0.02}Ga_{0.98}N$ Barrier층으로 형성된 InGaN MQW 발광층, p-$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 내부 Clad층으로 적층되어 있다. 그리고 $In_{0.15}Ga_{0.85}N$ QW층수는 총 3개이며, 사파이어 기판은 절연체이므로 n-전극은 n-GaN Conductor층까지 에칭하여 형성한다. 그리고 C면 사파이어 기판은 벽개성(쪼개짐, Cleavage)이 없기 때문에 종래 AlGaAs계 반도체 레이저에 사용되어온 방식처럼 벽개면을 레이저의 공진기 면으로서 사용할 수 없다. 따라서 Epitaxial 층을 위쪽에서 Dry Etching하여 공진기 면을 형성하였다. 그리고 Etching 단면의 표면코팅 처리를 통해 반사율을 50%정도까지 증가시켰다. 레이저의 기본 사양은

Ridge Stripe형 레이저이며, Etching Stripe 폭이 4μm, 공진기의 길이는 550μm이다.

그림 7은 상온에서 직류 전류를 인가한 경우 InGaN MQW LD의 발광출력과 순방향 전압-전류의 관계를 나타낸다. 전류 80mA까지는 발광출력이 단조 증가함으로써 LED와 같은 자연방출의 특성을 보이고 있으나, 80mA 이상에서는 발광출력이 급격히 증가하여 유도방출 즉 레이저 발광의 특성을 나타낸다. 전류밀도의 문턱치는 3.6kA/cm^{2}이고, 80mA에서의 구동전압은 5.5V이다. 최근의 LD 제품들은 종래의 사양들과 비교할 때, 전류, 전압의 문턱치가 점차 낮아지고 있다. 1996년경에 개발된 청자색 LD의 발진파장은 현재 390~470nm범위에서 제어 가능하여 식물공장용 광원으로서 매우 적합하다[7, 8]. 하지만 실용화를 위해서는 상온 CW 조건에서 1만 시간 이상으로 수명을 증대시킬 필요가 있다. 수명을 결정짓는 요인으로서 발열이 가장 큰 문제가 될 것이다. 그리고 GaN계 LD의 저가격화도 식물공장에 적용하는데 있어서 중요한 요구조건이 될 것이다.

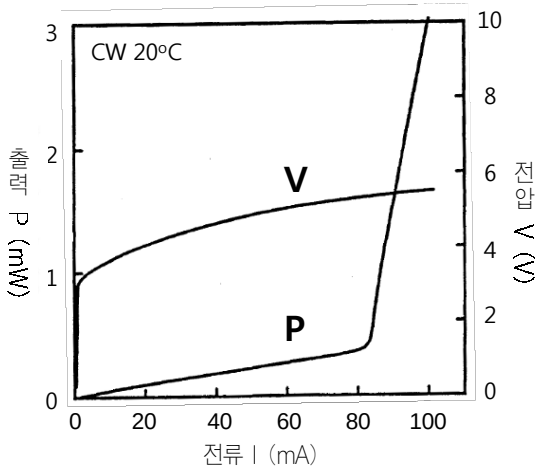

그림 7. 직류 전류 인가 시 InGaN MQW LD의 발광출력과 순방향 전압-전류 특성

4. 요약 및 전망

LD와 LED를 비교할 때, LD가 LED에 비해 불리한 점은 가격이 비싸다는 점과, 균일한 광 조사를 위한 별도의 대책이 필요하다는 점이다. 가격 측면에서는 단위 출력 당 코스트를 고려하면 LD가 LED보다 오히려 더 효율적으로 활용가능하며, LD로부터 나온 광을 균일하게 확산시키기 위해서는 확산 렌즈나 확산 필름 등을 사용하는 방법 등이 검토될 수 있다. 광을 확산시키는 과정에서 광의 손실을 최소화하는 방안 또한 강구되어야 할 것이다. LD가 LED보다 유리한 점도 많이 있다. 고출력, 고효율이며 전류로 직접 변조가능하다. 최대의 이점은 LED의 2배 이상에 달하는 발광효율이다. 현재 LED 식물공장에서 소요되고 있는 전력사용량을 고려할 때 코스트를 더욱 절감할 수 있는 최선의 방안은 저가의 LD를 광원으로서 사용하는 것이다.

LED와 LD는 완전 제어형 식물공장에서 종래의 고압 나트륨 램프나 형광등에 비해 결정적으로 유리한 점이 두 가지 있다. 첫 번째는 5만 시간에 달하는 장수명 특성이고, 두 번째는 수백 μs의 주기로 간격을 두고 조사 가능하다는 점이다. 발광효율도 종래의 광원이 20~30% 수준이므로 LD의 경우 특히 유리하다. 단점으로서는 단위 출력 당 제품가격이 다소 높다는 점이지만, LD의 저가격화는 향후 DVD 레코더 시장의 확대 여부에도 영향을 받을 것이다. 이러한 점들을 종합적으로 고려할 때 가까운 시일 내에 LED는 물론이고 LD를 광원으로 사용하는 식물공장이 보편화될 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

〔1〕 이상우, 식물공장과 LED 인공광 이용한 식물재배, 광학과 기술, 14권, p.12, 2010.
〔2〕 김연중, 한혜성, 식물공장의 전망과 정책과제, 농정포커스, 49호, 2013.
〔3〕 高辻正基, 植物工場の基礎と實際, 裳華房, 1996.
〔4〕 Takashi Mukai et al., Jpn. J. Appl. Phys. 38, p. 3976, 1999.
〔5〕 Yasuhiro Mori et al., Laser Review, p.602, 2002.
〔6〕 Shuji Nakamura, Appl. Phys. Lett. 69, p.4056, 1996
〔7〕 Y. Narukawa et al., Appl. Phys. Lett. 70, p.981, 1997.
〔8〕 Shuji Nakamura, Science 281, p.956, 1998.

◇ 저 자 소 개 ◇

성열문(成烈汶)

1966년 11월 2일생. 1992년 2월 부산대 전기공학과 졸업. 1994년 2월 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 8월~1998년 7월 일본 Kyushu대학(Pos-doc.). 1998년 8월~1999년 7월 Kyushu대학 조수. 1999년 8월~2006년 2월 Miyazaki대학 조교수. 2006년 3월~현재 경성대학교 전기공학과 교수. 2011년 9월~2012년 8월 미국 University of Wisconsin-Madison 방문교수.

Tel : (051)663-4777
Fax : (051)624-5980
E-mail : ymsung@ks.ac.kr