식품산업 적용을 위한 LED 기술과 미생물학적 연구동향

LED technology and microbiological research trends for applying to food industry

도정선, 방우석*

Jung-Sun Do, Woo-Suk Bang*

영남대학교 LED-IT융합산업화연구센터 및 식품영양학과, 영남대학교 식품영양학과

LED-IT Fusion Technology Research Center and Dept. of Food and Nutrition, Yeungnam University

Department of Food and Nutrition, Yeungnam University

서 론

최근 고령화, 핵가족화의 인구변화와 더불어 Well-Being, LOHAS(Lifestyle of Health And Sustainability)와 같은 식문화 트렌드의 변화로 인해 소비자들의 건강식품, 친환경식품, 신선편이식품 등의 수요가 증가하면서 이에 따른 식품의 위생적 품질관리와 안전성이 대두되고 있다. 우리나라 식중독 발생 통계에 따르면 2002년 77건, 2,939명에서 2010년 271건, 7,218명으로 발생건수와 환자수가 증가하고 있는 추세이다. 불검출(불명), 자연독, 화학물질을 제외한 전체 식중독 85.3% 중 세균성 식중독이 57%를 차지한다. 세균성 식중독은 Norovirus를 제외한 *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Vibrio parahaemolyticus, Salmonella sp., Clostridium perfringens* 등의 병원성 미생물이 주요원인이다(1).

식품관련 질병의 원인인 세균의 생육을 억제하고 식품의 저장기간 연장을 위해 살균을 하는데 일반적으로 가열, 냉동과 같은 물리적 방법과 화학적 합성품(보존제, 방부제 등)이 사용된다. 가장 일반적으로 이용되고 있는 살균방식인 가열처리는 미생물저해와 효소불활성화에 뛰어난 장점이 있는 반면 영양 손실, 품질열화 등의 단점을 갖는다. 이와 같은 단점을 보완하는 냉장 및 냉동 방법은 저온유지를 위한 온도관리 및 해동 시 품질저하의 단점을 가지며(2), 화학적 처리의 경우 식품의 품질저하는 막을 수 있으나 미생물의 저항성, 약제의 잔존 위험성, 환경오염의 문제를 가지고 있다(3). 따라서 오염과 변형이 없고 식품자체의 기능성 성분을 함유한 고품질의 식품을 생산하기 위해서 여러 가지 비가열 가공기술(non-thermal process)(4)과 무균포장기술의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중에서 LED를 이용한 새로운 연구 분야의 기술에 주목하고 있다.

LED(Light Emitting Diode)광원은 백열전구, 형광램프, HID(High Intensity Discharge)램프와 같은 기존 광원에 비해 친환경, 고효율, 에너지절약, 반영구적수명을 지니고 있다. LED는 빛을 필요로 하는 모든 분야에 적용 가

* Corresponding author: Woo-Suk Bang
Department of Food and Nutrition, Yeungnam University
Tel: +82-53-810-2877 Fax: +82-53-810-4768 E-mail: wsbang@ynu.ac.kr

능하므로 광원 및 조명제품, 가전제품, 교통신호등, 자동차 등의 여러 가지 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다(5). 최근 광감작제와 가시광선파장을 이용한 미생물의 불활성화 연구(PDI)의 유효성을 통해 이를 의학적 용도로 응용한 광역학치료(PDT)의 사례가 보고되고 있다(6). 또한 특정파장대의 laser, lamp 등의 다양한 광원 외에 특정파장대의 LED 빛을 이용한 광치료(Light therapy)에도 적용되고 있다(7). 이외 채소, 과일 등의 생육, 저장기간 중 변화, 품질에 영향을 미치는 신기술로써 연구되고 있다(8). 따라서 본 연구에서는 이러한 LED광원의 특성과 이를 병원성미생물에 이용한 국내외 연구들을 요약 기술 하고 식품산업에의 응용가능성에 대해 알아보고자 한다.

본 론

1. LED(Light Emitting Diode)

급속한 경제 발전으로 전 세계적인 에너지 소비가 증가하게 되었으며 지구온난화, 탄소배출량 증가와 같은 지구환경 문제를 발생시키게 되었다(9). 에너지 · 자원 절감 및 환경보존을 위해 UN 기후변화협약 교토의정서(Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change), EU의 WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), EEE (Electrical and Electronic Equipment), RoHS (Restriction of Hazardous Substances), ELV (End of Life Vehicle) Directive와 같은 강력한 국제 규제가 본격화되면서 세계적으로 전기 에너지 절감을 통해 저탄소, 녹색성장을 위해 LED는 필수적인 광원으로 자리 잡았다(10).

LED는 발광다이오드, 즉 스스로 빛을 발생하는 다이오드이다. 1907년 H.J. Round가 발광현상을 발견한 이후 1952년 J.R. haynes 등이 Ⅲ-Ⅴ족 화합물을 이용하여 pn 접합부에서 발광을 관측하였고 1955년 G.A. Wolff가 GaP를 이용하여 발광다이오드를 제조하였다. 1962년 미국의 General Electrin사에서 GsAsP(Gallium Arsenide Phosphide) 물질을 이용한 적색 LED 개발을 시작으로 고휘도 및 초고휘도의 적색 및 주황색 LED, 녹색 및 청색 LED, 백색 LED의 생산이 가능해 지면서 총천연색(full color)구현이 가능해졌다(11). 이후 LED 는 기술발전에 의한 발광 효율의 증가, 단가 하락 등으로 기존 광원을 대체할 수 있는 차세대광원으로써 조명분야를 비롯한 빛을 필요로 하는 산업 전반에 걸쳐 응용되고 있다(12). LED의 동작원리는 P형, N형 반도체를 결합시킨 PN 접합(junction)에 순방향 전압을 인가하면 전도대의 전자가 가전자대의 전공사이의 결합과 재결합에 의해 밴드갭(band gap)에 해당하는 전기적 에너지가 열변환의 중간단계를 거치지 않고 직접 빛 에너지로 변환되어 방출된다. 반도체칩 각각의 화합물 구성원소의 배합에 따라 정공과 전자의 위치 에너지 차에 의한 천이(Transmission)현상에 의해 발광세기가 좌우되며 각각 다른 파장을 만들어 빛의 색상이 결정된다(11, 12).

LED의 장점은 기존 백열전구, 형광램프, HID램프와 비교하였을 때 반도체 재료로 이루어진 단단한 고체 형태의 작은 점광원으로써 기존 광원에 비해 소형 · 경량이므로 공간의 효율성이 높다. 또한 유리관을 사용하지 않으므로 진동과 충격에 강하고 소자 그 자체의 수명이 반영구적이므로 기존 광원의 수십~수백배 긴 수명을 지녀 폐기 쓰레기 발생이 적고 백열전구의 필라멘트나 형광등의 수은(Hg)과 같은 중금속을 사용하지 않아 친환경적이다. 현재 실용화 되고 있는 LED 효율은 30~80 lm/W로 백열전구의 4~6배 정도로 높아 백열전구를 대신해 이용할 경우 에너지 절감을 통한 경제적 이득에 효과적이다(5). 또한 기존 광원과 같이 부가회로 사용, 예열 시간 등이 필요하지 않기 때문에 점등과 소등 속도가 100 ns 이하로 매우 빠르다. 복사되는 빛 중 가시광 영역의 에너지 변환율은 10~20% 정도로 백열전구에 비해 높고 자외선 복사, 적외선 복사는 거의 포함되지 않으므로 조명되는 물건의 온도를 상승 시키지 않는다. 반면에 제품의 특성에 따른 정전기에 약한 특성과 기존 광원과의 다른 구동회로의 필요에 의해 전원전압의 차에 따른 밝기변화, 응답성, 회로상 누설전류 등의 문제가 해결이 요구되어진다(13, 14).

Table 1. LED industry strategies in countries around the world(15)

국가	백열전구 사용 금지시기	LED 조명 개발·보급 계획
한국	2013~	○ "LED/반도체조명산업 발전전략" - 2012년 까지 140lm/W급 LED 기술개발 추진
		○ LED 원천기술 개발, 조명제품 개발, 장비 개발 등 R&D에 2012년 까지 1,500억원 이상 투자 ○ 2010년 까지 공공기관 조명의 30%를 LED 조명으로 교체(2008, 2009년까지 공공기관 LED 도입률
		○ "LED조명 15/30 보급 프로젝트" - 2015년까지 LED조명비중 30% 달성, 에너지 4백만 TOE 절감
일본	2012～	○ "Light for the 21st Century" 프로젝트 - 2010년 까지 조명에너지 20%절감
		○ 2011년 상반기PSE(Product Safety of Electric Appliance and Materials) 확정 및 Eco point 지급으로 LED 보급확대 - 연간수요 2,500만개인 할로겐램프, 향후 4년간 50%가 LED로 대체 전망 - 연간수요 1억개인 E26 베이스 전구(백열전구, 삼파장 형광등), 향후 4년간 25%가 LED로 대체 전망
미국	2012년~100W급 이상 사용금지 2014년~40W급 이상 사용금지	○ "Next Generation Lighting Initiative(Vision 2020)" - 2020년 까지 200lm/W 개발, 조명시장 50% 점유
		○ 환경보호청(EPA), 2011년 10월부터 Energy Star마크 조명기구 인증 시행 및 인증제품 구매 시 정부 장려금 지급 ○ 2014년 ~ 40W급 이상 사용금지 2011년 LED조명시장 30% 이상 성장 예상 ○ 캘리포니아, 2012년부터 백열전구 전면 퇴출 ○ Next Generation Lighting Initiative(Vision 2020)을 통해 조명의 50%까지 LED 보급 계획
EU	2009년~100W급 사용금지 2012년 9월~ 백열전구 사용 금지	○ 2010년 12월 유럽LED품질 헌장 발표 ○ 2012년 9월부터 백열연구 사용 금지 에너지 효율 등급 의무화(A~G등급) ○영국, 2016년부터 탄소제로주택 의무화 및 2015년부터 에너지 효율 등급 낮으면 주택 판매 금지
중국	2015년~30%를 LED로 교체	○ 중국 5개 지역에 "국가 반도체조명 산업화기지" 지정 육성
		○ 십성만장(2009.4), 10개 도시에 1만개 LED조명 설치 ○ 반도체조명에너지절감산업발전에 관한 의견(2009.10) - 2015년까지 기능성조명 20%, 액정배광장치 50%, 조경장식제품 70% 점유율 목표 ○ 2010년 12월 국가발전위원회 LED조명 3개 분야 28개 조명업체 선정 ○ 2011~2012년 LED가로등 시장 대폭 확대 예상(2009년 총 22.2만개 LED가로등 설치) ○ 조명인증 등급관리 강화, 2010년 광량기준에서 2011년 광량기준+CCT(Correlated Color Temperature) 기준

2. 국제 및 국내 LED 산업의 현황

전세계 LED 시장은 2009년 55억 달러(약 6조 1,500억원)을 달성 한 후 꾸준한 증가세를 유지하고 있다. 분야별 LED 시장의 경우 LCD TV, 자동차 분야, 일반조명의 비중이 가장 클 것으로 전망되며 특히 TV 백라이트 부문이 가장 높은 비중을 차지하고 있다(13). 2012년 이후 에너지 및 자원 절감, 환경보존을 위한 각국 정부정책에 의해 LED 일반조명 분야의 성장이 큰 비중을 차지하게 되었다. 특히 거리등(Streetlight, 가로등)의 경우 각국 정부에 의한 교체 프로젝트를 추진 중이며(Table 1) 상업용 및 주거용 조명의 도입률 증가로 일반 조명부문이 LED 시장을 이끌어갈 것으로 예상된다(15).

국내의 경우 LED 시장은 세계시장의 12% 이상을 차지하고 있으며 2006년 이후부터 국내 생산량이 수입물량을 추월하기 시작하였다. 반도체, 디스플레이, 자동차, 통신, 인터넷 산업 등과 더불어 광반도체 기술 발달에 따른 LED 시장의

성장을 감안한다면 현재의 메모리 반도체를 능가하는 거대한 LED 시장을 형성할 것으로 예상된다. 이에 차세대 성장 동력으로써 국가 정책으로 2012년까지 1,500억원 이상을 투자하여 LED를 개발하고 2015년 까지 전체조명의 30%를 LED조명으로 교체하는 목표를 수립하였다(13).

현재 LED 관련 기술은 일본, 미국, 유럽 등의 선진국 대비 80% 수준이나 백색 LED의 구현기술은 취약하기 때문에 높은 LED 기술수준을 따라잡고 특허를 피해 새로운 원천기술 개발, 가격 경쟁력 확보, 효율과 수명에 따른 전원장치 및 방열기술 등의 집중적인 개발이 요구되어진다(5).

3. 가시광선 파장의 LED 및 응용분야

LED는 반도체칩 각각의 화합물 구성원소의 배합에 따라 가시광선 LED(Visible Light Emitting Diode: V-LED), 적외선 LED(Infra Red Light Emitting Diode: IR-LED), 자외선 LED(Ultra Violet Light Emitting Diode: UV-LED)의 각 영역의 파장을 가지는 LED로 구분된다(10). 특히 V-LED는 400 nm~700 nm 사이의 파장 규모를 가지며 인간의 시각을 일으키는 가시광선 영역인 380~780 nm 사이의 영역에서 적색은 610~700 nm대, 녹색 500~570 nm, 청색은 430~500 nm의 파장을 나타낸다. 이 3원색을 혼합하여 백색을 구현할 수 있으며 그 외 보라색, 황갈색, 노란색, 오렌지색 등을 파장대별로 발광할 수 있다(5). 가시광선 LED는 일반적으로 각종 실내외조명, 휴대폰, 노트북, LCD BLU, 자동차, 조명표시소자, 감성조명 등에 이용되고 있으며 전체 LED 시장의 90~95%를 차지하고 있다(13). 최근 의료, 농업, 환경, 조선, 해양, 어업 등 응용범위가 넓어짐에 따라 빠르게 LED 응용제품 연구와 개발이 확대되고 있다(16).

농업과 광기술의 융합을 의미하는 에그리포토닉스(agriphotonics)산업은 최근 빠르게 개발, 적용되고 있는 분야로써 식물조명을 이용한다. 시설 내의 고도의 환경제어 및 자동화를 통하여 작물을 공장생산과 동일하게 계획생산할 수 있는 시스템인 식물공장은 친환경, 안전성 확보, 식물의 대량생산, 의학용 GMO(genetic modified organims)의 대량생산 등에 활용할 수 있다(8). 식물생장에 필요한 빛의 파장은 주로 적색(640~680 nm)과 청색(450~480 nm)으로 광량, 조사시간 조정에 의해 식물의 성장속도, 형태를 조절 할 수 있다고 알려져 있다. 식물의 색소단백질인 피토크롬(phytochrome) 색소의 변화를 주기 위해서는 660 nm 부근의 적색광과 420 nm 주변의 청색광이 유효하다(7). 광합성에는 클로로필(엽록소) 색소가 관련하고 있으며, 단색광으로 적색(660 nm), 청색(450 nm)의 특정 파장이 이용 가능한 광원이 된다. 또한 LED의 특정 단색광을 이용하여 채소 및 과실의 Vitamin C, 당도, 인삼의 사포닌 증가와 같은 식물 기능성물질의 향상 등의 기능을 수행할 수 있다(17).

또한 종전의 화학적 방제법으로 인한 저항성 해충의 발생, 잔류독성, 환경오염 등과 같은 문제점으로 인해 새로운 해충 방제기술로써 LED 조명을 이용한 방제법이 이용되고 있다(18). 곤충은 가시광선 영역 중 285~580 nm를 인지하는 것으로 알려져 있으며 종에 따라 다양한 파장에 반응한다. 이를 이용하여 해충이 싫어하는 황색광(580~650 nm)의 LED 조명을 사용하여 모기, 파리, 진딧물 등의 해충을 예방하고 이 외 여러 해충들을 제어하기 위한 연구들이 진행되고 있다(19).

어업분야에서는 오징어집어등, 부표 광원, 등명기(Buoy) 등에 LED가 이용되고 있다(5). 오징어집어등에 사용되는 LED는 오징어의 어종에 따라 다소 차이가 있으나, 470~500 nm의 청색광에 가장 잘 반응하는 것으로 알려져 있다. 수심 30~50 m의 심해에 서식하는 오징어를 어획하기 위해 해수에서 광투과율이 높고 오징어류 시감도의 최대치 부근과 거의 일치하는 470 nm 부근의 청색광이 가장 적합하다. 이러한 LED의 이용은 지향성 광원을 사용한 높은 수중투과능력, 소비전력 절감의 장점을 가진다(20).

그리고 고도의 산업발달과 함께 병원의 의료환경 또한 변화하고 있으므로 환자들의 환경심리적인 특성을 반영하여 조도와 색온도를 LED를 이용하여 병원 공간별로 알맞은 환경을 조성하고 있다(21). 현재 백색 LED를 이용한 헤드조명과 bed light, 전자파 절감 조명기구 등이 의료용 조명기구에

이용되고 있으며 430~490 nm의 청색 LED를 이용한 아말감 경화장비, 광치료 수복재 중합장비 외에 내시경시스템, LED 형광 현미경 기술 등의 기술이 개발되었다. 400~700 nm 사이의 청색(Blue)영역은 여드름과 아토피성 치료 등과 같은 피부질환의 치유에 가장 많이 이용되며 그 외 치아의 살균, 미백, 혈당조절 등에도 이용되고 있다(22-24). 최근 가시광선 파장을 가진 LED를 이용한 광역학 치료의 연구에 의해 완제품이 판매되고 있으며 적색(Red) 및 자외선 영역인 600~890 nm의 파장은 통증완화, 근육치료, 치아 살균 등에 효력이 입증되어 현재 치료기로 상용화가 이루어지고 있다.(25).

색채치료는 색의 에너지와 성질을 이용하여 심리치료 및 의학에 활용하는 요법이다. 색채는 심리, 물리적인 신체활동과 질병의 경과에도 많은 변화를 일으키므로 자신의 체질에 맞는 컬러를 통해 심리적 안정감을 찾고 신체 밸런스 조율과 유지에 활용 할 수 있다. LED는 이러한 단파장의 빛을 이용하여 색채치료에 적용할 수 있으며 이러한 색채치료 방법의 일환으로 감성조명이 출시되고 있다. 감성조명은 각기 다른 생활환경에 따라 사람들의 신체변화에 적합한 조명을 연출하는 것을 의미하는 것으로 색온도와 조도의 관계는 공간의 분위기와 심리상태 및 뇌파에 영향을 미친다. 이를 활용하여 LED 광원의 특성에 따라 학습영역간의 빛의 변화가 성적향상에 도움을 줄 수 있는 것으로 알려졌다(26).

이 외에도 가시광선을 이용한 무선 가시광통신분야, 우주분야, Solar light와 같은 재생에너지 분야 등에 다양하게 적용되고 있다(5). LED파장의 적용에 따른 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며 효과적인 파장의 개발과 더불어 응용분야의 확대와 실생활의 이용이 증가할 것으로 기대된다.

4. LED의 미생물학적 살균 Mechanism과 적용

최근 새로운 항균성치료의 방법으로 가시광선 광원을 사용하는 photodynamic inactivation(PDI)은 그람음성균과 그람양성균, mycoplasma, fungi, virus, yeast등의 불활성화에 효과적이다(27). 이는 UV-C 조사 등과 같은 종전의 방법에 비해 빠르고 효과적이며 무독성을 띄고 미생물 저항을 유도 하지 않는다(28). 최근 PDI방식을 의학에 적용한 광역학치료(photodynamic therapy : PDT)는 다양한 광독성을 가진 천연정유(精油), 화학적염료인 광감작제 등에 가시광선, 적외선의 다양한 파장을 가진 laser를 이용하여 악성종양, 상처감염, 건선, 여드름, 표재성 피부감염, *Helicobacter pylori*에 의한 감염 등의 치료에 이용되고 있다(29). 이러한 PDI, PDT 같은 항균성 치료법들은 Photosensitization 현상을 기초로 한다. 이 원리는 박테리아에 광감성의 물질을 투여하여 고정시킨 후 광감작제(photosensitizer)의 최대 흡수에 적절한 가시광선파장의 lamp, laser 등을 조사한다. 빛에 민감한 광감작제는 저에너지의 바닥상태(ground state)에서 고에너지의 삼중항상태(triplet state)가 되면서 활성화반응이 일어난다. 이때 전자나 수소전달에 의해서 생체분자의 환경에 직접적인 반응을 유도하여 free radical, radical 이온물질의 생성(type Ⅰ reaction), 산소분자의 에너지 이동에 의해 활성화된 singlet oxygen(type Ⅱ reaction)의 높은 활성 발생의 두 가지 경로가 동시에 작용하며 경쟁적으로 일어나게 된다. 결과적으로 세포에 과다한 독성 작용이 일어나면서 세포의 손상과 사멸을 유도하게 된다(30).

몇몇 박테리아의 endogenous porphyrins의 생산은 내인성 광감작제로 잘 알려진 전구체인 5-aminolevulinic (ALA)의 생산에 중요하며 세포에서 heme을 합성하는 동안 자연적으로 발생하는 대사물질로 내인성 광감작제인 prophyrin IX (PpIX), uroporphyrin, copro-porphyrin의 생산을 유도한다(31). 박테리아에 의해 생성된 porphyrin의 경우 그람양성균, 바이러스, fungi, yeast 등은 다양한 자연발생적인 porphyrin과 합성유도체와 함께 광감작제 등에 효과적으로 처리되고 살균작용을 나타낸다. 또한, 그람음성균인 *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*의 경우 자연발생적인 porphyrin이나 음이온 유도체의 이용에 의한 광역학 불활성화가 일어나지 않는다. 이는 소수성이거나 음전하를 띄는 porphyrin의 세포내 흡수를 막는 그람음성균 세포 외피의 복잡성 때문이라고 생각되며 이와 같은 그람음성균 세포들의 광역학 불활성화는 뚜렷

한 차이를 보이지 않는다는 것이 증명되었다(32). 그람음성균의 세포외피는 내세포질막과 외막으로 구성되는데 이는 peptidoglycan을 포함한 periplasm에 의해서 분리된다. 외벽은 단백질과 porin function, lipopolysaccharide (LPS) trimers, lipoproteins를 포함하는 높은 heterogenous 구성요소를 가지므로 음전하가 밀집된 준연속체를 외벽표면을 가진다. 이와 같이 복잡하게 조직화된 세포체계는 몇몇 광감작제의 침투를 억제하므로 그람음성균의 외막형태는 광감작제에 물리적, 기능적으로 장벽의 형태임을 알 수 있다(33). 또한 Nitzan 등(34)에 의해 porphyrin에 의한 빛의 흡수에 따른 광역학 불활성화 연구에서 그람음성균에 비해 그람양성균의 porphyrin의 양이 지배적이기 때문에 결과적으로 광역학 불활성화에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 그람양성균의 porphyrin 존재량이 크고 산소의존적인 과정을 거치는 경우 불활성화에 미치는 영향은 더 커질 것으로 사료된다.

현재 주로 이용되고 있는 laser는 질환부위의 국소적인 면적의 치료에 효과적인 반면, LED광원을 이용할 경우 특정 파장의 적절한 조사 내에서 질환부위의 넓은 면적을 효과적으로 치료할 수 있게 된다. LED 광원은 PDI, PDT의 원리와 마찬가지로 LED의 광자(photon)가 세포조직 내 색소포(chromophore), 광수용기(photo acceptor) 등에 흡수되어 세포간의 광-생화학 반응을 유도함으로써 세포의 대사활동을 촉진시키게 된다. 현재 의학적 치료에서 부가적인 치료로써 상처치유, 조직회복, 통증의 경감과 같은 치유(healing)와 염증발생의 억제, 신경학상의 통증경감 등에 이용되고 있으며 그 외 콜라겐합성 강화 및 MMP의 증가억제와 같은 피부재활(rejuvenation) 등의 효과를 나타내고 있다(35). 그러므로 연구 시 그람음성균, 그람양성균의 광역학 불활성화에 영향을 미치는 porphyrin, 산소의존성, peak 파장의 흡수 등을 고려하여 그에 맞는 LED의 파장과 조도방사를 선택하여 수행되어야 한다.

최근 LED 광원을 식품산업에 적용하기 위한 미생물학적인 연구들은 종전의 자외선 외의 가시광선, 적외선 조사에 따른 미생물의 살균영향에 대한 연구가 이루어지고 있다. LED와 같이 자발적 방사를 하지만 스펙트럼의 폭이 넓고 빛 파장의 divergence가 넓어 짧은 거리에서도 높은 지향성의 정도를 얻을 수 있는 특수의료용 고휘도 LED인 SLD (super luminous diode)를(36) 이용하여 405 nm와 470 nm의 청색광에서 *S. aureus*, *P. aeruginosa*의 살균력(37)을 알아본 결과 405 nm에서 두 균에 대해 살균이 효과적이었으며, 470 nm에서 *P. aeruginosa*는 대체적으로 효과적인 살균이 가능했지만 5 Jcm^{-2} 이상 노출된 후부터 살균력이 급격히 감소하였다. SLD의 405 nm파장과 880 nm파장을 함께 조사하여 *S. aureus*, *P. aeruginosa*의 살균영향(38)을 알아본 결과 *P. aeruginosa*의 경우 405 nm의 10 Jcm^{-2}에서 95.1%, 470 nm의 5 Jcm^{-2}에서 96.5%의 살균효과를 나타내며 405 nm와 880 nm의 20 Jcm-2에서 93.8%의 살균효과를 통해 세 가지 파장과 조도방사에서 뛰어난 살균력을 보인다. Chukuka 등(39)이 Methicillin Resistant *Staphylococcus Aureuss* (MRSA)를 대상으로 SLD를 405 nm에서 여러 조도방사에 노출시킨 결과, 15~60 Jcm^{-2}사이의 조도방사에서는 살균효과가 높았지만 1.0~15 Jcm^{-2}사이의 사멸율이 조도방사에 의한 에너지밀도의 증가로 보았을 때 더 효과적이라 사료된다. 또한 12 Jcm^{-2}이상 조사 하였을 때 50% 이상을 살균시켰으며 55 Jcm^{-2}이하 조사 시 90% 정도의 살균효과를 나타냈으나 그 이상부터 작은 증가가 일어나 조도방사를 더 높여 연구할 필요가 있다. 이와 같이 균에 따라 배지의 종류, 조사파장, 사용된 SLD 광원들의 parameter는 조금씩 차이는 있지만 일반적으로 병원성세균의 살균에 효과적이었다. Michelle Maclean 등(40)은 400~420 nm 사이의 가시광선영역에서 살균력이 가장 효과적인 파장대인 405 nm를 이용하여 MRSA 외의 그람양성균, 그람음성균에 10 mW/cm^2 의 방사조도로 노출하였다. 그 결과, 그람양성균에 속하는 *S. aureus*, MRSA, *S. epidermidis*, *C. perfringens*, *Streptococcus pyogenes*, *Enterococcus faecalis* 의 경우 초기 10^5 CFU/ml 에서 *E. faecalis* 를 제외하고 60~90분 사이의 노출 후 살균효과 측정 결과 모두 사멸하였다. 그람음성균 중 *Acinetobacter baumannii* 는 405 nm에서

180분 동안 4.2 $\log_{10}$이 감소하였고 *E. coli* 는 300분 노출에 3.1 $\log_{10}$의 감소를 나타내었으며 그 외 *Proteus vulgaris, P. aeruginosa, Klebsiella pneumoniae*도 300분 정도의 노출에서 유사한 패턴을 나타냈다. 이는 405 nm에서 그람음성균이 그람양성균보다 살균에 더 긴 노출시간이 필요하다는 것을 알 수 있었으며, *S. aureus*의 살균에 가장 효과적이었다. 선행 연구들을 종합적으로 유추해볼 때 이러한 빛에 의한 세균의 불활성화 기작들은 박테리아에 의해 생성된 porphyrin에 의한 빛의 흡수 또는 free radical의 증가, 활성화된 산소분자에 의해 cytoplasmic membrane protein과 DNA에 영향을 미치거나 세포 자체에 직접적 영향을 미쳐 발생된 것으로 사료된다.

또한 이미 400 nm 파장 이상의 가시광선 파장의 빛은 높은 에너지 밀도에서 사용되었을 때 UV와 비슷한 살균의 영향을 나타낼 수 있다고 연구되었다(41). 시토신과 티민같은 DNA의 피리미딘염기 베이스내의 이중결합에 의해 피리미딘염기들이 서로 이중결합을 형성하게 되고 퓨린염기의 수소결합의 구조가 손상되어 세포의 사멸을 유도하는 것으로 밝혀졌다.

LED의 이용은 최근 실시된 연구를 통해 항생제 내성에 대한 위험성이 낮고 화학물질인 광감작제를 이용하지 않는 장점을 가진다. 또한 LED 자체의 가시광선 파장을 이용하여 안전성이 높아 의학적 적용에 높은 실용성을 가지며 병원성 세균의 살균효과에 큰 가능성을 가진다. 이와 더불어 농업분야에서 단일파장 및 복합파장의 직접조사를 통한 식물생장, 해충제어와 관련된 부분들의 연구를 통해 식품의 오염과 부패에 관여하는 세균을 통제하는데 적용이 가능하다고 생각된다.

결 론

식생활 트렌드 변화에 의해 신선하고 안전하며 고품질의 친환경적 식품의 요구가 늘어남에 따라 생물학적 위해요소의 식품유래 병원균, 부패균과 같은 위해성미생물의 증식억제와 종전의 살균방식들의 단점들을 보완 가능한 새로운 살균방식이 요구되고 있다. 이러한 소비자의 식품안전과 건강의 욕구를 충족시키기 위한 변화의 기술로써 LED광원은 친환경, 고효율, 안전성, 반영구적 수명의 장점을 지니고 있다. 최근 LED는 자외선 외 가시광선의 파장을 이용해 조명 외 농업, 어업, 의학을 비롯한 산업전반에 걸쳐 기술의 발달에 큰 영향을 미치고 있다. 특히 의학적 적용에서 PDI, PDT와 같은 병원성 미생물의 저해 연구가 활발히 진행되고 있으며 단일 LED를 이용한 병원성 미생물의 저해연구 및 식물과 과실 등의 식품에 직접적인 적용을 통해 식품자체에 LED 조사가 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해 식품에 적용 가능성이 보이며 특정파장, 노출 횟수, 노출 시간, 미생물의 특성 등을 고려한 기술개발과 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. Korea Food and Drug Administration (2014) Available from: http://www.mfds.go.kr/e-stat/index.do Accessed on 2014
2. Kim YS, Shin DH (2003) Researches on the volatile antimicrobial compounds from edible plants and their food application. Korean J Food Sci. Technol, 35, 159-165
3. Kim YS, Park IS, Ha SD (2009) Application sanitizer for the control of microorganisms in food. Food Science and Industry, 42, 26-35
4. Shin JK, Kim BR, Kim AJ (2010) Nonthermal food processing technology using electric power. Food Science and Industry, 43, 21-34
5. Nam SY, Park MS, Gang JG (2010) The LED technology and application of green energy. SangHakdang, Seoul, Korea p 11-114
6. Maisch T (2007) Anti-microbial photodynamic therapy: useful in the future? Lasers Med Sci. 22, 83-91
7. Chan Y, Lai CH (2003) Bactericidal effects of different laser wavelengths on periodontopathic germs in photodynamic therapy. Lasers Med Sci, 18, 51-55

8. Nam SY, So, CH, Jo KH (2011) Industrial of agriculture. RGB Press. Seoul, Korea p 32-145

9. Hwang MG, Park JH, Im JM, Lee JW (2009) Eco-friendly, high-efficient white LED lighting. A-jin, Seoul, Korea p 32-100

10. Jang WJ, Hwang MG, Park SO, Lee SN, No JY, Jo HM (2009) Introduction to LED lighting technology. A-jin, Seoul, Korea p 22-120

11. Park MS, Jang JO (2009) Application Practical of LED. SangHakdang, Seoul, Korea p 15-82

12. Um GY (2008) display engineering. gijeon, Seoul, Korea p 320-368

13. BIR research group (2010) Eco-friendly, high-efficient LED technology development trends and market outlook. BIR Inc, Seoul, Korea p 27-188

14. Han SH, Kim YJ, Kim JH, Kim DJ, Jung JY, Kim S, Cho GS (2011) Control of heat temperature in light emitting diodes with thermoelectric device. Journal of the Korean Vacuum Society, 20, 280-287

15. Kim HK, Choi CS (2009) Study on Thermal pattern and current characteristics of an LED street lamp. Trans. KIEE, 58, 357-361

16. Jang JS, Park IG (2010) LED technology Key Issue and development direction. J kor KIIEE, 24, 24-35

17. Kim MJ, Li X, Han JS, Lee SE, Choi JE (2009) Effect of blue red LED irradiation on grosth characteristics and saponin contetns in panax ginseng C.A. Meyer. Korean J. Medicinal Crop Sci. 17(3):187-191

18. Yang YC, Lee SG, Lee HK, Kim MK, Lee SH, and Lee HS (2002) A piperidine amide extracted from Piper longum L. fruit show activity against Aedes aegypti mosquito larvae. J Agric Food Chem 50, 3765-3767.

19. Oh MS, Lee HS (2010) Development of phototactic test apparatus equipped with light source for monitoring pests. J Appl Biol Chem. 53, 248-252

20. Choi SK, Kim SJ, Park DW, Kil GS, Choi CY, Song SB (2010) Design and fabrication of an energy saving LED-fishing lamp. Journal of the Korean Society of Marine Engineering. 34, 515-521

21. Choi YM, Yang NW (2000) Study in the patients' behavior and architectural correspondence for the multi-patient room. Korea Institute of Healthcare Architecture. 6, 71-78

22. Kim JT, Bae SB, Youn DH (2010) Medical treatment machinery based on LED light source. Electronics and telecommunications trends, 25, 59-71

23. Vinck EM, Cagnie BJ, Cornelissen MJ, Decledcq HA, Cambier DC (2005) Green light emitting diode irradiation enhances fibroblast growth impaired by high glucose level. photomedicine and Laser Surgery, 23, 167-171

24. Boulos PR, Kelley JM, Falcao MF, Tremblay JF, Davis RB, Hatton MF, Rubin PAD (2009) In the eye of the beholder-skin rejuvenation using a light-emitting diode photomodulation device. Dermatologic Surgery, 35, 229-239

25. Russell BA, Kellett N, Reilly LR (2005) A study to determine the efficacy of combination LED light therapy (633 nm and 830 nm) in facial skin rejuvenation. Journal of Cosmetic and Laser Therapy, 7, 196-200

26. National IT Industry Promotion Agency(nipa) (2010) Technology Trends of medical/environment LED. Weekly Technology Trends, 1457, 84-88

27. Durantini EN (2006) Photodynamic inactivation of bacteria. Curr Bioactive Compounds, 2, 127-142

28. Calin MA, Ion RM (2011) Optical method for monitoring of photodynamic inactivation of bacteria. J Biol Phys, 37, 107-116

29. Ganz RA, Viveiros J, BS, Ahmad A, Ahmadi A, Khalil A, Tolkoff MJ, Nishioka NS, and Hamblin MR, (2005) *Helicobacter pylori* in patients can be killed by visible light. Lasers Surg Med, 36, 260-265

30. Calin MA, Parasca SV (2009) Light sources for photodynamic inactivation of bacteria. Lasers Med Sci, 24, 453-460

31. Nitzan, Y, Salmon-Divon M, Shporen E, Malik Z. 2004. ALA induced photodynamic effects on gram positive and negative bacteria. Photochem Photobiol Sci, 3, 430-435

32. Jori G, Fabris C, Soncin M, Ferro S, Coppellotti O, Dei D, Fantetti L, Chiti G, Roncucci G (2006) Photodynamic therapy in the treatment of microbial infections: basic principles and perspective applications. Lasers Surg Med, 38, 468-481

33. Nikaido H. 1994. Prevention of drug access to bacterial targets: permeability barrier and active efflux. Science, 264, 362-368

34. Nitzan Y, Salmon-Divon M, Shporen E, Malik Z (2004) ALA induced photodynamic effects on Gram positive and negative bacteria. Photochem photobiol sci, 3, 430-435

35. Hamblin MR, Demidova TN (2006) Mechanisms of low level light therapy. Proc of SPIE, 6140, 6140011-61400112

36. Wikipedia (2014) Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Superluminescent_diode Accessed on 2014

37. Guffey JS, and Wilborn J (2006) In vitro bactericidal effect of 405-nm and 470-nm blue light. Photomed Laser Surg, 24, 684-688

38. Guffey JS, and Wilborn J (2006) Effect of combined 405-nm and 880-nm light on *Staphylococcus aureus* and *pseudomonas aeruginosa in Vitro*. Photomed Laser Surg, 24, 680-683

39. Enwemeka CS, Williams D, Hollosi S, Yens D, and Enwemeka SK (2008) Visible 405 nm SLD light photo-destroys Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*(MRSA) *In Vitro*. Lasers Surg Med, 40, 734-737

40. Maclean M, MacGregor SJ, Andersom JG, and Woolsey G (2009) Inactivation of bacterial pathogens following exposure to ;ight from a 405-Nanometer light-emitting diode array. Appl Environ Microbiol, 75, 1932-1937

41. Gates FL (1930) A study of the bactericidal action of ultraviolet light. Ⅲ: The absorption of ultraviolet light by bacteria. J Gen Physiol, 14, 31-42