

조명과 광원 기술

■ 김진중 / 세종대학교 광공학과

■ 홍성호, 김정원 / 태원전기산업(주) 부설연구소

요약

조명에 사용되는 광원은 여러 가지가 있다. 백열등, 텅스텐 할로겐 램프, 형광등, 고압 나트륨등, 메탈할라이드 램프, 고압 방전 램프, 등등, 각 가지가 사용되고 있다. 각종 램프들의 성능이 꾸준히 개선되고 새로운 형태의 램프들이 개발되고 있으나, 그 성능이 다른 재래식 램프에 비하여 괄목하게 우수한 새로운 광원은 초고주파 방전을 이용한 무전극 방전등이 최근 각광을 받고 있다. 초고주파 방전에 의한 광원 기술은 전극을 사용하지 않기 때문에 조명 램프로서 많은 이점을 갖고 있으며, 따라서 그에 관한 연구개발이 오랫동안 추진되어 왔다. 특히 1990년대 초에 출현한 초고주파 방전에 의한 무전극 황전등은 조명 기술 분야에 새로운 획을 긋는 사건으로 많은 기대를 주었다. 최근에 한편으로는 제 2세대 kW-급 무전극 황전등의 출현이 예고되어 있고, 다른 한편으로는 100-W 급의 저출력 무전극 방전등이 개발되어 조명 뿐 만 아니라, 프로젝션 디스플레이, HDTV 등등, 첨단 정보표시 광원으로도 각광을 받고 있다. 본 논문은 초고주파 방전에 의한 광원 기술을 둘러보고, 고출력 광원의 문제점을 논의하고, 새로운 가능성을 보이는 저출력 신광원의 원리 및 응용에 관하여 논의하고, 앞으로 이 분야 산업 기술 전망을 조감해 본다.

서론

빛은 우주에 존재하는 만물에 연관되지 않는 것이 없

다. 우리가 매일 보는 태양광이나 별빛으로부터 야간이나 밀폐된 공간에서 인간의 활동을 가능하게 하는 조명등, 광고등, 각종 정보표시판, 의료용 램프, 산업 조명 램프, 영화 및 영상 광원, 무대 조명 램프, 등등, 무수한 종류가 있다. 이 글에서는 이러한 광원들 중에 조명에 관련된 것들을 관찰하고, 이러한 조명용 신광원의 최근 기술개발 현황을 고찰하고자 한다. 조명용 광원 중에서도 고출력 무전극 광원 램프의 기본인 고주파 방전을 이용한 램프를 고찰하고, 특히 최근 급진전되고 있는 최첨단 무전극 방전등의 독특한 특성과 그 응용 가능성을 조감해 본다. 본 절에서는 먼저 광원의 발광 특성을 표시하는 항목들과 배경을 간단히 설명하고, 2절에서는 고주파 방전 램프의 물리적 특성을 기술하고, 초고주파 방전을 이용한 최근의 무전극 방전등의 특성을 소개하고, 3절에서 이러한 첨단 조명 광원 기술의 응용 및 앞으로의 전망을 조감해 본다. 이 글은 조명과 광원의 관련을 이 분야 비전문가를 위하여 썼으며, 아울러 이 분야 연구에 종사하는 연구인들의 더 많은 관심을 불러일으키려는 의도로 썼음을 밝힌다.

조명에 사용하는 광원을 논의할 때는 출력광의 특성을 표시하는 몇 가지 중요한 항목이 있다. (1) 광도 (luminous intensity) (2) 조도 (illuminance) (3) 휘도 (luminance) (4) 광 변환 효율 (luminous efficacy), (5) 연색성 지수 (color rendering index, CRI, Ra), (6) 연관 색온도 (correlated color temperature, CCT) 등등이 있다. 이러한 용어들의 설명은 이 분야 관련 서적을 참조하기를 권장한다 [Coaton and Marsden, 1997].

가시광선은 대략적으로 파장 380~780 nm 영역의 광

을 말하며, 이 파장대의 혼합 비율과 강도에 따라 인간이 느끼는 색깔이 달라진다. 인간의 눈의 광에 대한 민감도는 가시광선 파장대에서 균일하지가 않다. 그림 1에서 보이듯이 오프렌 선은 밝은 주위 환경에 적응된 눈의 민감도, 즉 명순응 비전(photopic vision)의 민감도를 보이고, 왼편 선은 어둠에 적응된 눈의 민감도, 즉 암순응 비전(scotopic vision)의 민감도를 나타낸다. 조명 광원은 모두 밝은 휘도임으로 명순응 비전에 가장 많은 연관성이 있다. 따라서 조명에 사용되는 광원의 스펙트럼은 명순응 비전과 비교하여 논의함이 합당하다.

과학적 기술을 사용한 최초의 조명용 광원은 1897년 토마스 에디슨이 발명한 텅스텐 백열등이다. 텅스텐을

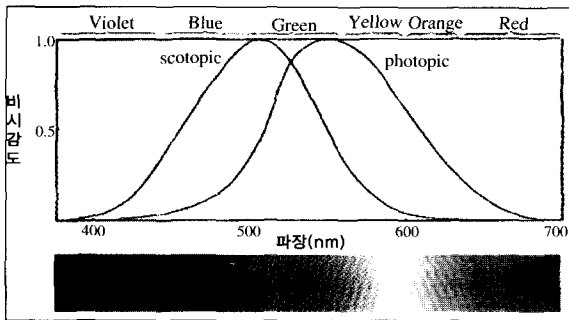


그림 1 가시광선의 스펙트럼 및 눈의 민감도

이용한 백열등은 많은 개선과 발전을 거쳐 현재도 널리 사용되고 있다. 기구가 간단하고, 색상이 온화하며, 값이 저렴하여 에너지 절약이 크게 요구되지 않는 곳에서는 편리하게 사용된다. 그러나 백열등은 수명이 1~2천 시간 이내이고, 14 lm/W 정도의 낮은 효율을 가져 에너지 절약이 절실히 요구되는 현대 조명 분야의 주된 광원으로서 적합하지가 않다. 참고로 1995년 기준으로 국내 전력 소비의 약 20%가 조명 에너지로 사용되었다.

1930년대 말 새로운 광원으로 형광등이 탄생하여 많은 발전을 거쳐 현재 널리 사용되고 있다. 현재 조명용 광원의 약 70~80%를 형광등이 차지한다. 간단히 그 형광등의 원리를 설명하면, 형광등은 일차적으로 자외선 광원이다. 수 토르 (Torr) 기압의 불활성 가스를 유리관 내에서 방전시키면 관내의 온도가 상승하고 함께 봉입된 수은이 증기화 된다. 증기화된 수은 (Hg) 원자들이 가스 방전에서 발생한 전자들과 충돌에 의하여 여

기 되어 방전 전기 에너지의 약 70%가 수은의 주 공명선인 254 nm, 그리고 약간은 185 nm의 자외선으로 변환된다. 이렇게 발생한 자외선은 관 내부 벽에 도포된 형광 물질 (예, calcium halophosphate)을 조사하게 된다. 그러면 형광 물질은 파장이 자외선 파장보다 더 긴 (즉 광 에너지가 작은) 가시광선 대에서 빛을 발한다. 이러한 형광은 파장대가 넓은 띠의 빛이므로 인간의 육안에 백색으로 보인다. 물론 형광체에 따라 색깔을 내는 것도 있다.

형광등도 오랜 기간 개선되고 새로운 기술이 개발되어 지금은 조명 광원의 근간이 되어 있다. 그러나 재래적인 형광등은 전극을 사용하기 때문에 방전 중에 전극에서 발생하는 금속의 스퍼터링 (sputtering) 으로 방전관의 흑화 현상이 일어나고, 방전 자체를 저해하는 상태로 되어 수명과 성능의 저하를 가져온다. 이러한 재래식 전극형 형광등을 개선하기 위하여 오래 전부터 라디오파 (RF파)를 사용한 무전극 형광등이 연구개발되어 왔다. 그러나 낮은 효율 그리고 단기적인 경제성 때문에 상용화가 쉽게 일어나지 않았다. 선진국 기술의 최근 동향은 RF파를 이용한 무전극 형광등이 상용화 단계까지 왔고, 앞으로 가격 경쟁력의 향상과 기술의 개선으로 무전극 형광등이 전극형 형광등을 대체하는 것은 시간 문제일 것으로 보인다. 무전극 형광등의 상용화는 에너지 절약, 폐기물 극소화, 유지보수 비용의 절감, 등등 많은 장점 때문에 각 국에서 중점적인 연구 개발이 지속적으로 추진되고 있다.

초고주파 방전 광원

가스나 금속 증기의 초고주파 방전 (very high frequency discharges, VHFD)은 여러 가지 광원의 궁극적인 적용 기술의 하나로 인식되어 오랫동안 연구개발되어 왔다 [Wharmby, 1993]. 초고주파 방전은 방전구 안에 전극이 없이 이루어지기 때문에 재래식 전극 램프에 비하여 많은 장점을 갖고 있다. 예를 들면, (1) 광원 램프 자체의 수명이 길고, (2) 수명 기간 동안 광속유지율 (lumen maintenance)이 거의 일정하고, (3) 광변환 효율 (lumen efficacy)의 변화가 극히 적으며, (4) 제작이 간편하고, 무수은 및 폐기물의 최소화로 높은 환경



친화성, 등등, 이다. 그러나 전자파 발전기 자체의 효율, 전자파의 방전 플라즈마 결합 효율, 발광 가스의 부적합성, 그리고 재래식 전극 광원의 단기적이지만 더 낡은 경제성 때문에 전자파 방전을 이용한 광원의 실용화는 속히 일어나지 않았다.

1990년대 초반 미국의 Fusion UV System사에서 자외선(UV) 광원으로 황 증기(sulfur vapor)를 실험하던 중 2-원자 황 증기의 특유한 발광 특성이 발견되어 Fusionlighting사가 창설되었다 [Turner, et al., 1994]. 그 후 많은 관련 특허가 등록되었고, 당시 조명 기술 분야에서는 물론 미국의 주요 언론을 통하여 많은 각광을 받았으며, "21세기의 램프(the Lamp for the 21st Century)"로 부각되었다 [Turner, et al., 1995]. 그러나 2,500여 개의 제품이 출시된 후 주변 기기의 문제점, 특히 구동 전원의 신뢰성 부족, 전도열에 의한 주변 기기의 산화에 따른 임피던스 매칭의 문제, 광전송 및 분산 기술의 부족, 응용기술 개발의 필요성, 등등, 몇 가지 중요한 문제가 대두되면서 1997년 제품의 시장 철수가 일어났다.

그러나 광원 기술 자체의 혁신성에는 변함이 없었고, 그 후 지속적인 연구개발이 진행되어 왔다. 미국 이외에도 일본, 중국, 네덜란드, 등등, 조명 기술 선진국에서도 연구개발이 진행되고 있으며, 특히 최근에는 혁신적인 기술들이 개발되어 특허 출원이 지속되고 있다. 특기할 것은 kW-급 고효율 광원으로 시작된 초고주파 방전등이 최근에는 100-W급 저출력 광원으로도 개발되어 조명은 물론, 프로젝터 디스플레이, HDTV, 의료 조명, 등등, 첨단 기기에 사용될 수 있는 최상의 고휘도 광원으로 실용화 단계에 와 있다 [Kirkpatrick, 2001]. 또한 무전극 황전등으로 시작된 이 기술이 InBr, CsBr, 등과 같은 다른 2-원자 메탈 할라이드(metal halide)에도 적용될 수 있다는 것이 시연되었으며, 연색성지수(Ra) 98을 갖는 거의 완벽한 백색광원이 개발되고 있다 [Fukagawa, 2000]. 앞으로 다른 발광 특성을 갖는 좋은 발광체가 더 발견될 것으로 예상된다. 불행이도 이러한 새로운 발광원에 대한 기초적 연구는 국내 외에 거의 전무하여 기구 최적화에 필요한 물리적 파라미터에 대한 정보가 부족한 상태이다.

국내에서도 한국전력 전력연구원에서 처음 광원 개

발에 성공하였고 LG 전자가 Fusionlighting사의 초기 제품과 유사한 무전극 황전등을 개발하였다. 한국 에너지기술연구원과 태원전기산업에서도 공동으로 광원 및 주변 기술, 그리고 광전송 기술을 개발하고 있다. 그러나 이 분야 정부 지원이 거의 전무한 상태이며 앞으로 이러한 첨단 기술의 선진국 의존은 당분간 지속될 것으로 전망된다. 조명 기술 관련 전 세계 시장이 연간 70조 원 이상인 것을 생각하면 안타까운 일이다.

초고주파 방전 광원

위에서 말한대로 비형광 광원을 사용하는 초고주파 방전 램프는 무전극 황전등이 그 시조다 [Turner, et al., 1994]. 여기서는 제 1세대 무전극 방전등의 문제점을 지적하고, 앞으로 해결하여야 할 기술적인 사항들을 열거하기로 한다.

초고주파 방전 광원 시스템의 핵심은 크게 두 가지 측면에서 고찰하여야 한다. 첫째 측면은 발광원 자체의 특성이다. 예를 들면 2-원자 황 분자(S₂)의 특유한 발광 특성이다. 황 분자의 에너지 준위를 보면 이론적으로는 자외선이 가장 강한 전이 특성을 갖는다.

[Peterson, et al., 1980]. 실제로 무전극 황전등이 발명된 것도 위에서 언급한대로 처음에는 황 증기를 자외선 광원으로 개발하려고 시도하는 중에 어떠한 특정한 조건이 만족되면 높은 연색성지수를 갖는 백광 스펙트럼이 나온다는 것이 발견되었기 때문이다. 여기서 "특정한 조건"이란 황 분자의 밀도가 높아 공명 전이(resonance transition)에 해당하는 자외선광이 바닥상태(ground state)에 있는 중성 황분자들(neutral sulfur molecules)에 의하여 모두 재흡수되는 소위 복사광 트랩(radiation trapping 혹은 radiation imprisonment)이라는 물리 현상이 일어나도록 하는 것이다. 두 번째 측면은 방전 방법의 특성이다. 초고주파를 이용한 방전은 전극을 사용하지 않기 때문에 부식이 없고, 방전 램프의 내부 흑화현상을 만들지 않는 이상적인 기술로 오랫동안 연구 되어왔다. 황분자 증기와 마이크로파 방전의 결합은 혁신적인 램프의 가능성을 보인 한 예이다.

여기서 무전극 황전등의 특성을 간단히 재고한다. 수 mg의 황 가루를 탁구공 크기의 석영구(직경 2-3 cm) 안에 아르곤(Ar)과 같은 불활성 버퍼 가스와 같이 넣고



기획 시리즈 ③

〈표1〉 Fusion Lighting사의 SOLAR 1000TM Sulfur Lamp 사양 및 특성

전자파 주파수	2.45 GHz
발 광 물 질	황
정격 소비전력	1,350 W
광변환 효율 (lm/W)	100
상관색온도 [CCT(K)]	5,600
연색지수 (Ra)	80
수명 (hr)	>50,000

[자료 : Turner, et al. 1995]

이 석영구를 초고주파 공동 (예, 2.45 GHz microwave cavity)에 넣어 전극 없이 방전시키는 것이다. 처음에는 버퍼 가스가 방전을 시작하고, 온도가 올라가면 황분자는 2-원자 분자 증기로 변하여 방전을 주도하게 된다. 이러한 증기 상태의 2-원자 황분자 (S₂)가 250 여 개의 전이를 이루는데 이들 중 125 여 개가 가시광선 전역에서 광을 발하게된다. 따라서 연색성 지수가 높은 백광이 발하게 된다.

초기에 개발된 무전극 황전등의 사양 및 특성이 〈표1〉에 요약되어 있다.

그러나 많은 기대 속에 각광을 받고 탄생한 제1세대 무전극 황전등은 다음과 같은 몇 가지 문제점과 어려움을 보였다.

1. 램프를 포함하는 전자파 공동의 열에 의한 산화에 따른 전도성 저하
2. 램프 회전 에 따른 불편
3. 램프 주변 기기의 열 처리
4. 전자파 발진기인 마그네트론 구동 전원의 신뢰성 부족
5. 초기 점등의 재현성 부족
6. 재점등 시간 단축 필요성
7. 광 분산 및 전송 기술, 등등, 응용 기술의 미비

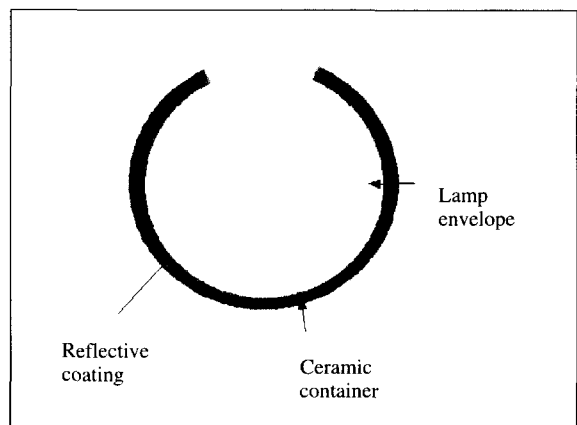
이러한 문제점들은 제2세대 초고주파 방전등 개발에서 필히 다루어야 할 사항들이다. 원리적으로는 해결되지 못할 것이 없으나 일부는 실용화면에서 도전적인 문제들이다. 새로운 기술이기 때문에 기존의 광원을 대체하기에는 많은 주변 기술이 병행하여 개발되어야 할 것이다. 또한 발광 메카니즘에 관한 광과학적 연구는 거의 전무하여 체계적인 연구도 수행되어야 할 것으로 사려된다.

제2세대 고효율 초고주파 방전 램프의 개발 경향은

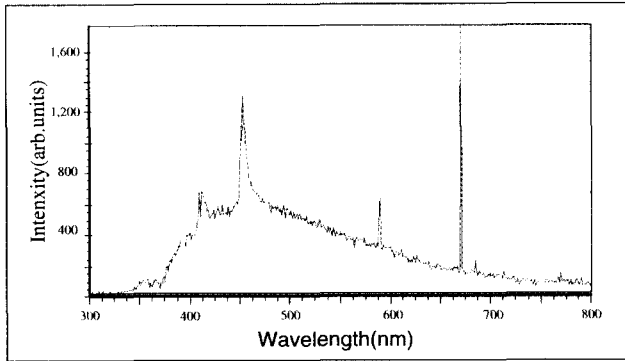
위에 열거한 중요한 문제점을 해결해야 하는 방향으로 움직이겠지만, 최근에 광 추출 방법에서도 중요한 진전이 일어나고 있다. 예를 들면, 제1세대에서 사용하던 광원 램프를 둘러싼 초고주파 캐비티를 측면은 고반사 세라믹으로 둘러싸고, 광을 추출하는 곳만 열어 놓는 소위 개구형 램프 (aperture lamp)를 사용하여, 한 램프 시스템에서 연색성지수를 79에서 86까지 높이는 결과를 얻었다 [Kirkpatrick, 2001]. 이것은 초고주파 방전 램프의 작동 파라미터를 조정할 수 있는 기술로 앞으로 광추출 기술 개발이나 및 연색성 지수 조정에 유용하게 사용될 것이다.

저출력 VHF 램프

고출력 (kW-급) 초고주파 방전등의 어려운 문제점들의 해결을 위한 연구가 진행되는 사이 100-W 급의 저출력 초고주파 방전등 개발이 진행되고 있다. 이 분야의 선두자는 역시 미국의 Fusionlighting 사이다. 최근 반도체 단일 소자를 사용하여 증폭기 없이 수백 MHz 대 (예 : 700 MHz대)의 발진기를 개발하여 직경 10 mm 미만의 소형 무전극 유도방전등을 개발하였다. 이러한 램프를 전반사의 세라믹 구에 삽입하여 작은 개구 (aperture)를 통하여 광을 추출하는 소위 개구 램프 (aperture lamp)를 개발하였다 [Kirkpatrick, 2001]. 이 기술은 현재 프로젝션 디스플레이, HDTV 등등 정보표시 기술에 응용하기 위한 것이나, 휘도를 조금 내리면



a) 개구램프의 원리



b) 마이크로파력 300 W에서의 InBr의 발광 스펙트럼

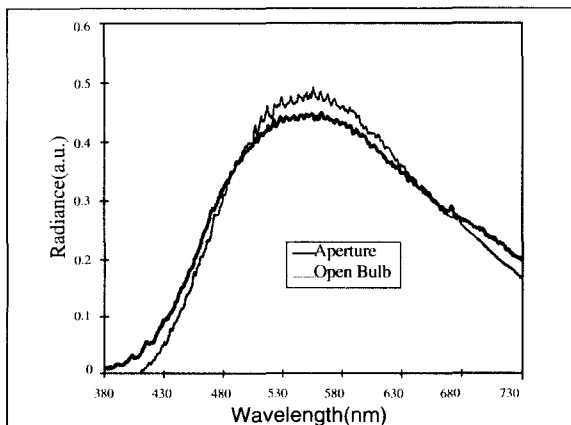
그림 2 개구램프의 개념과 InBr의 발광 스펙트럼

광변환 효율이 90 lm/W 이상으로 높아져 조명에도 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

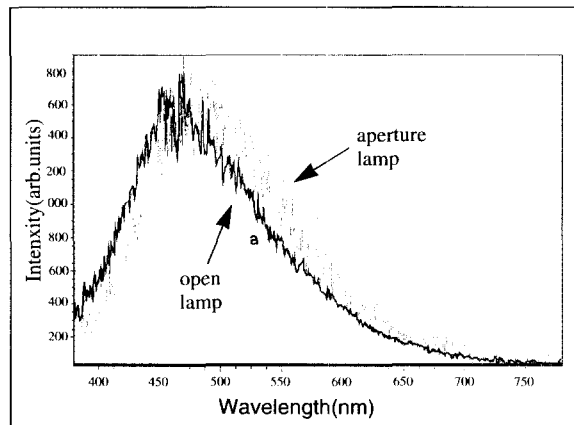
개구 램프의 원리 자체는 새로운 것이 아니다. 광 복사기(photocopy) 장비에서 광휘도를 증가하기 위하여 오래 전부터 사용되어온 기술이다. 그 개념은 그림 2-(a)에서 보인다. 발광원이 들어있는 램프를 고반사율 세라믹 용기 안에 삽입하고, 필요에 따라 다른 직경의 구멍 혹은 개구 (aperture)를 통하여 광을 추출하는 기술이다. 구조는 간단하지만 이러한 구조가 주는 광학적 의미는 중요하다. 특히 위에서 말한 복사광 트랩의 원리에 따르는 발광원의 경우 광 스펙트럼의 변형을 자연스럽게 제공하는 특성을 갖는다. 즉 내부 반사체 때문에 전이 확률이 높은 자외선은 용기 벽에 반사되어 발

광체 가스나 증기가 다시 흡수하고, 필요한 가시광선 부분은 실질적 전이 효율이 높아지는 효과를 내어 백색광 부분의 광이 증가하는 결과를 초래한다. 즉 연색성 지수가 괄목하게 증가한다. 이러한 원리를 이용하여 2-원자 metal halide (예 : InBr)를 방전하여 연색성지수 98의 거의 완벽한 백색광을 발광시켰다. 휘도는 구멍의 크기에 따라 다르다. 표면에 있는 개구에서 가시광선이 추출되기 때문에 Lambertian 분포를 보인다. 최근 이러한 원리를 이용하여 Fusionlighting 사에서 개구 램프 (aperture lamp)를 개발하여 좋은 결과를 보였다. 그림 3-(a)는 여기서 나온 발광 스펙트럼이다. 보이는 것과 같이 개구 램프는 열린 램프보다 더 균일한 광분포를 보인다. 태원전기에서도 비슷한 실험을 하였는데, 그림 3-(b)에서 보이듯이 꽤 다른 광분포를 얻었다. 이 두 경우 실험적 여건이 다르기 때문에 더 제어된 실험을 하여야 정확한 메카니즘을 이해할 수 있을 것이다. 한가지 분명한 것은 황 전등 스펙트럼에 비하여 붉은 부분이 많아 연색성이 좋은 것은 정성적으로도 관찰할 수 있다. 저출력 고휘도 램프에서 연색성 지수 98의 거의 완벽에 가까운 백색광 특성을 발한 기록이 알려졌다 [Fukagawa, 2000]. 이 램프의 특성에 관하여는 후에 다른 곳에서 발표할 것이다.

초고주파 방전 광원의 응용



a) Fusionlighting 사 실험



(b) 세종대/태원전기 실험

그림 3 Aperture lamp와 Open bulb lamp 스펙트럼 비교



가정 및 사무실과 같이 비교적 소형 공간 조명에 적합한 저출력 VHF드 램프는 아직 개발단계이나 그 전망은 대단히 좋다. 또한 이러한 광원의 광학적 특성 및 응용성은 프로젝션 디스플레이, 슬라이드 프로젝터, overhead projector (OHP), 영화 및 영상기, HDTV, LCD backlighting, 의료용 내시경 등등 imaging optics와의 접목으로 기존 고가의 특수 광원을 대체함과 동시에 한층 더 나은 고분해능 영상을 제공하며, 비행기 착륙용 램프, 자동차 전조등, fiber optics 분산 조명등, 재료 처리용 광원 (curing light)으로서 개발이 가능해 고휘도를 필요로 하는 정보표시 첨단 광원에서부터 일반 조명에까지 광범위한 응용이 예상된다.

결론

조명을 위한 광원 기술은 이제 새로운 광원의 출현으로 다변화하고 있다. 그 중에 초고주파 방전을 이용한 고출력 광원 기술은 이제 새로운 국면으로 진입하고 있다. 고출력 광원은 초기에 대두되었던 어려운 문제들이 해결되기 시작하고 있고, 곧 제 2세대 고출력 초고주파 방전 광원이 상용화될 전망이다. 또한 초고주파 방전 광원 기술은 이제 100-W급 저출력 고휘도 램프로도 개발되어 일반 조명 뿐 아니라 정보표시 광원으로 가장 이상적인 스펙트럼을 가져 첨단 전자 장비용 최상의 광원으로 응용될 전망이다.

국내외 조명 및 관련 분야만 해도 전 세계적으로 연간 약 70조원 이상의 시장인 이 분야에 IT 산업의 광원을 포함하면 초고주파 방전 광원 기술의 산업성 및 시장성은 참으로 방대할 것이다. 국내 산학연 기술진도

이러한 기술 개발을 적극적으로 추진 할 수 있도록 정부 및 기업의 지원이 절실히 필요하다. 이 분야의 국내 연구개발 활동은 극히 한정되어 있어 산학연 연구인들의 더 많은 참여와 활동이 추진되어야 할 것이다.

〈전기의 세계 1월호〉

참고 문헌

- Coaton, J. R, and Marsden, A. M.), ed., "LAMPS AND LIGHTING," [Arnold, London, UK, 1997].
- Donald, A. M., Turner, B. P., Dolan, J. T., Kirkpatrick, D. A. and Leng, Y., "High frequency inductive lamp and power oscillator," U.S. Patent, 6,137,237 (1999).
- Fukagawa, Y., "New Electrodeless Lamp System Produces White Light like Sunlight," technological news, R&D 00/05/16-1 (2000), www.matsushita.co.jp.
- Kirkpatrick, D. A., "Aperture Lamps," Proc. the 9th International Symposium on the Science and Technology, Cornell University, Ithaca, N.Y., U.S.A., 12-16 August 2001 (Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 2001) p. 309.
- Peterson, P. A. and Schlie, L. A., "Stable Pure Sulfur Discharge and Associated Spectra," J. Chem. Phys., Vol. 73, pp. 1551-1566 (1980).
- Turner, B. P., Ury, M. G. and McLennan, D. A.: "Microwave excited sulfur lamp," Paper QA2. 47th Annual Gaseous Electronics Conference (Gaithersburg, Md, USA, (1994).
- Turner, B. P., Ury, M. G., Leng, Y. and Love, W. G., "Sulfur lamps-Progress in Their Development," IES Annual Conference, Paper 87 (1995).
- Wharmby, D. O., "Electrodeless lamps for lighting," a review. IEE Proceedings 140A, pp. 465-473 (1993).