

무전극 황전등: 원리, 현황 및 전망

(The Electrodeless Sulfur Lamp: the Principle, Status, and Prospect)

김진중

태원전기산업(주) 부설연구소

kimjj1@soback.kornet.net or kimjj@ctp.or.kr

1. 서론: 최근 혁신적인 무전극 황전등 (electrodeless sulfur lamp)이 발명되면서 고휘도 조명기술에 새로운 가능성을 보여 주었다 [1, 2]. 미국 Fusion Lighting사에 의하여 발명된 무전극 황전등은 90년대 중반부터 조명 기술계에서 상당한 주목을 받았으며, "21세기의 전등"으로 크게 각광을 받기 시작하였다 [3]. 중국 및 일본에서의 연구 활동도 약간 알려져 있으며, 한국 내에서는 극히 한정된 그러나 깊이 있는 연구 활동이 진행 중이다 [4].

현재 사용되고 있는 조명용 광원(light sources for illumination)은 1879년 토마스 에디슨 (Thomas Edison)이 발명한 백열등, 1930년대 출현한 형광등과 같은 방전등 (glow discharge lamps), 그리고 그 뒤에 출현한 고휘도 메탈할라이드 전등 (metal halide lamp), 등등이 그 주종을 이루고 있다. 이러한 전등들은 효율, 연색성, 수명, 경제성 등에서 그 동안 많은 개선과 발전을 하였으나, 괄목할 진전을 위해서는 새로운 형태의 전등의 출현이 필요하다는 것이 널리 인식되어 왔다. 무전극 황전등은 다른 종류의 무전극 방전등들과 비교하여 월등한 성능을 갖고 있으며, 이미 실용화 단계에 와 있다.

이 논문에서는 먼저 황전등의 원리를 설명하고, 현재 기술의 현황을 알아보고, 황전등의 상용화 전망을 조감해 본다. 마지막으로 응용성도 간단히 설명할 것이다.

2. 본론: 무전극 황전등의 특성은 그 이름이 암시하듯 두 가지 측면에서 고찰해야 할 것이다. 첫째는 무전극 방전에 의한 여기 방식과, 둘째는 황 증기의 발광 스펙트럼의 특성이다.

무전극 방전은 글자 그대로 전극이 없이 고주파 전자파로 기체나 고체증기를 방전시키는 방법으로, 전극이 없기 때문에 sputtering에 의한 금속 오염이 없다. 고주파 방전 (high frequency discharges)에서는 전자들의 운동 때문에 생기는 일차 이온화 (primary ionization)만이 가스나 증기 방전을 일으키는 단 한가지의 현상이다. 다시 말해서, 전극을 쓰는 arc 혹은 glow 방전과는 달리 이온들은 방전에 참여하지 못한다. 고주파 전장 하에서 진동하는 전자는 전자장의 에너지를 직접 받지 못하고, 원자나 분자들과 충돌하여 에너지를 얻는다. 즉, 주어진 고주파의 주파수에 따른 전자들의 질서정연한 움직임이 충돌에 의한 무작위 운동 (random motion)으로 바뀌면서 에너지를 얻게 되는 것이다. 따라서 이러한 전자들이 충돌에 의하여 발광 원자들을 여기 시킨다. 여기 된 원자들이 각기 특유한 파장의 광을 발한다. 무전극 방전등이 전등 기구로서 갖는 가장 중요한 특성은 전극이 없다는 것이며, 그러한 장점 때문에 고주파에 의한 무전극 방전 현상은 광원 개발을 위하여 오랫동안 연구되었다 [5].

황 (sulfur)은 상온에서 고체 상태인 octa-sulfur (S_8) 로 존재하며, 융해점은 $121^\circ C$ 이고, $800^\circ C$ 이상에서는 분해되어 대부분 두원자분자인 di-sulfur (S_2)의 증기로 존재한다. 따라서 di-sulfur의 에너지 준위를 고찰하면 황전등의 spectrum을 이해할 수 있다. Di-sulfur의 첫번째 여기상태 (first excited

state) $B^3\Sigma_u^-$ 의 vibrational level들 ($v'=1-9$)과 ground state인 $X^3\Sigma_g^-$ 의 vibrational level ($v''=1-30$)들과 사이의 전이는 대부분 가시광선이나 자외선에 속하는 파장을 갖고 있다. 사실 이 영역의 전이 약 250 여 개 중 120 여 개에서 나오는 광선을 전부 합치면, 자연광에 가까운 spectrum이 되는데, 이것이 바로 황전등이 연색성 좋은 전등이 되는 중요한 이유 중의 하나이다. 황의 분광학적 연구가 오래 전부터 실시 되었으면서도 황전등이 발명되지 못한 이유는 B→X 전이에서 $v'=5-9$ 부근의 level들을 많이 채우는 조건을 만족시키는 기술이 알려지지 않았았기 때문인 것 같다. 상위에 있는 v' -level들이 가시광선 스펙트럼에 많은 발광을 하기 때문에 이 level들을 채우는 것이 필수조건이다.

황전등의 발광은 다음과 같이 성취된다. 직경 2-3 cm 정도의 석영구 안에 수 mg의 황과 수십 torr 아르곤 가스를 채운 후 마이크로파 cavity 안에서 방전을 하면 처음에는 아르곤 가스가 방전된다. 온도가 올라가면 황증기가 방전되면서 자연광에 가까운 백색광이 발광된다. 여기서 필요한 것은 마이크로파의 파력 밀도가 50 W/cc 이상이 되어야한다. 그림 1은 황전등의 발광 spectrum과 scotopic and photopic spectrum들을 비교한 것이다 [6].

이러한 황전등의 몇 가지 중요한 특성을 요약하면:

- 가시광선 전역에 걸친 자연광에 가까운 스펙트럼 (연색성 90 이상 가능)
- 광속에 자외선이 극히 적고, 적외선도 최소한 포함
- 고효율 (120 lm/W 가능)
- 장수명 (60,000 시간 이상)
- 점등 시간이 빠름 (25초 이내 100% 점등)
- 전등 자체의 크기가 작음 (2-3 cm 직경)
- 광 출력이 안정 (lumen maintenance stable)
- 수은이 없음

현존하는 조명용 전등 중에 이러한 특성을 전부 가진 것은 존재하지 않는다. 이러한 조명 기구가 이 기 실용화 단계까지 왔으나, 보편성 있게 상용화가 되려면 주변 기기의 신뢰도가 따라야 할 것이다. 백색광 방전등 자체의 개선 뿐 만 아니라, 다른 용도의 광원 개발에도 새로운 가능성이 보이게 되었다. 예를 들면, 좁은 색띠 내의 가시광원, 자외선 광원, 적외선 광원, 등등에서도 새로운 고휘도 광원이 가능할 것이다.

이러한 고효율 고휘도 전등은 그 응용성이 광범위하다. 산업체 공장이나 발전 시설, 야간 경기장 및 행사장, 공항 및 부두, 지하도 및 상가, 대형 온실 및 실내 농장, 등등, 장시간 조명이 필요한 곳에서 사용할 수 있으며, 특히 높은 천장이나 시설물 등, 유지보수가 어려운 곳의 조명에 안성맞춤이다. 그러나 활발한 응용을 위하여서는 조명이 필요한 곳까지 광 전달을 용이하게 하기 위하여 fiber optics나 light pipe 기술 등, 황전등과 같은 광원에 적합한 부수적 기술도 개발되어야 할 것이다.

3. 결론: 무전극 황전등의 발명은 고휘도 무전등 방전등 기술에 새로운 장을 펼친 사건이다. 높은 발광 효율 (120 lm/W), 자연광에 가까운 연색성 (90 이상), 장수명 (60,000 시간 이상), 광도 조절 가능 (20%선 까지), 짧은 점등 시간 (100%까지 30초 이내), 장시간의 광속 유지 (lumen maintenance는 광원의 수명과 거의 일치), 수은 없는 환경 친화성, 등등 재래적인 전등에서는 찾아보기 힘든 우월성과 잠재력을 갖고 있다 [7]. 그러나 무전극 황전등 기술은 이제 막 시작된 기술이며, 앞으로 광범위한 응용을 위하여서는 광원 자체의 연구는 물론, 주변 기기의 발전과 함께 더 많은 연구개발이 필요할 것이다. 또한 황전등에 사용하는 고주파 방전 기술을 다른 가스나 증기를 이용하여 특수 파장대의 광원 연구 개발에 응용하면 좋은 결과를 얻을 전망이다.

※ 본 연구의 일부는 과학기술부 기술개발 용역사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. 미국 특허 번호 5,404,076 (1995.4.4.): LAMP INCLUDING SULFUR.
2. J. T. Dolan, *et al.*, "A Novel High Efficiency Microwave Powered Light Source," The Sixth International Symposium in the Science and Technology of Light Sources, Budapest, Sept. 1992.
3. **New York Times** (1994.10.26.일자), "A Light to Replace Hundreds of Bulbs"; **Washington Post** (1994. 10.24.일자), "A New Kind of Illumination That Burns Brightly, but Not Out"; DoE press release (Dec. 1994): "DoE Unveils Revolutionary 21st Century Lighting Technology." The 1995 **Discover Award for Technological Innovation**; **Research & Development Award of the Top 100 Inventions of 1995**; **Lightfair International 1998 Award for Technological Innovation**; University of California NBNL Energy & Environment Division 1994 and 1995 Annual Reports (LBL-36553, UC-1600 April 1995) and (LBL-38352, UC-1600, May 1996), respectively, UC-LBL, Berkeley, CA).
4. 구선근, 박기준, 이영우, 김진중, "마이크로파 방전 고압 이원자황의 분광학적 해석 (Spectral Analysis of Microwave Discharged High Pressure Diatomic Sulfur Vapor)," 제 15회 광학 및 양자 전자 학술 발표회, 한남 대학교, 대전, 1998. 8. 19-20, 논문집 p. 140.
5. J. F. W. Waymouth, "Applications of Microwave Discharges for High-Power Light Sources," Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, edited by C. M. Ferreira and M. Moisan (Plenum Press, New York, 1993) p. 427.
6. Fusion Lighting home page [<http://www.fusionlighting.com>].
7. Internet home page: [<http://www.sulfurlamp.com>].

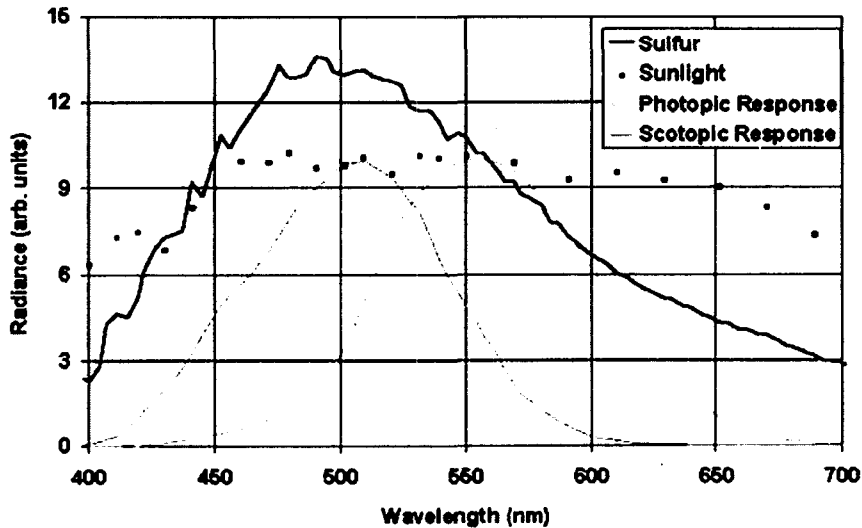


그림 1: Emission spectrum of the microwave-discharged sulfur lamp [Ref. 6]