

마이크로파 방전 무전극 황전등 연구개발

박기준, 구선근, 추장희
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

Development of microwave discharged electrodeless sulfur lamp

Kijun Park, Sun-geun Goo, Jang Hee Chu

Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 최근 10여 년간 고평도 방전등 기술은 많은 발전이 있었다. 특히 마이크로파로 방전하는 무전극 황 방전등 (Microwave discharged electrodeless sulfur lamp)은 1990년대 초반 Fusion lighting에 의해 소개된 이후 많은 발전을 거듭하여 왔다. 마이크로파 방전 무전극 황전등은 마그네트론에서 발생된 2.45 GHz의 마이크로파로 여기된 이원자 황으로부터 방출되는 빛을 조명에 사용한다. 전극이 없어 방전시 전극에 의한 전구의 손상이 없으므로 전구 자체의 수명은 반영구적이다. 이원자 황에서 방출된 빛은 가시광선 영역에서 연속적인 분광분포를 가지며 발광 효율은 100 lumen/W 이상으로 매우 높다. 본 논문에서는 전력연구원에서 국내 최초로 제작한 마이크로파 방전형 무전극 황전등의 전반적인 특성을 소개한다.

propagative structure형, surfatron형, 도파관형 등이 있다. 이중 eigen resonance는 외부로부터 발생된 플라즈마가 필요하므로 단독으로 쓸 수 없으며 propagative structure형 및 도파관형은 에너지 효율이 낮아 고효율 조명기기용 방전시스템으로는 적절치 못하다. 또한 surfatron형은 시스템 특성은 우수하나 2.45 GHz의 마그네트론을 쓰기에는 부적합하다. 따라서 충분히 높은 압력의 플라즈마를 얻어 자외선 영역에서 self trapping된 molecular radiation을 일으킬 수 있는 cavity 형식이 마이크로파 방식 무전극 황전등의 방전 시스템으로 적합하다.

1. 서 론

국내 총 전력에너지 수요의 20%가 조명용이고 그 수요는 증가 추세에 있으므로 효율이 뛰어난 조명의 연구개발이 필요하다. 조명 선진국에서는 이미 황, NbO, AlCl₃ 등의 광원 및 다양한 반사경 그리고 조명기기용 전원의 개발에 박차를 가하여 고기능 조명기기 개발이 실용화 단계에 접어들고 있는데 반해, 국내에서는 조명기기 개발과 관련된 연구 개발이 일부 추진중이나 만족할 만한 성과를 거두지 못하고 있다. 본 연구에서는 높은 발광효율을 가진 무전극 황전등을 개발함으로써 에너지 소비 합리화에 기여코자 한다[1].

무전극 황전등은 발광물질로 수은이 아닌 황을 사용하므로 수은에 의한 환경오염을 방지할 수 있어 환경 친화적 조명기기이다. 그리고 무전극 황전등은 높은 연색지수를 가지고 있어 색 재현성이 우수하며 태양광과 비슷한 연속적인 분광분포를 가지므로 형광등, 수은등, 메탈 하라이드등과 같은 특정 파장이 강조된 전등을 대체할 자연광에 가까운 조명환경을 구현 할 수 있다. 또한 무전극 황전등은 수만 lm의 높은 조도를 가지며 전극이 없으므로 일반 백열등에 비해 10배 이상의 긴 수명을 가진다. 따라서 장기간 고조도의 조명이 필요하거나 사람이 접근하기 어려운 장소에 사용하기에 편리하다.

2. 본 론

2.1 무전극 방전등의 기본 원리

일반적으로 무전극 전등은 전구 내부에 필라멘트나 전극이 없이, 전구 외부의 여기코일이나 마그네트론 등에서 발생한 전자파를 직접 발광물질에 인가하여 방전시키고, 이때 발생하는 빛을 조명에 사용한다. 무전극 전등은 그림 1에서와 같이 magnetron과 같은 전자파 발생장치와 이를 위한 전원 및 제어장치, 그리고 전구 및 전구에서 발생한 전자파의 외부유출을 방지하는 전자파 차폐장치 등 크게 네 부분으로 구성된다.

마이크로파 여기형 무전극 전등용으로 사용 가능한 방전시스템은 크게 cavity형, eigen resonance형,

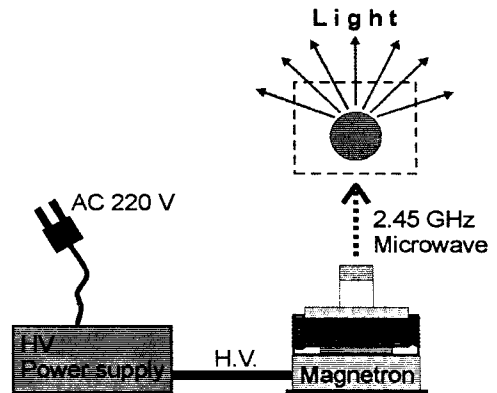


그림 1. 마이크로파 무전극 방전등의 일반적 구성도

황 증기의 효율적인 고압방전을 위하여 고주파 에너지가 모두 방전구에 흡수 되어야 한다. 고압 방전을 유도하기 위하여 비교적 작은 크기의 전구에 가스와의 충전을 하고 magnetron으로부터 고주파 전력을 흡수시키는 방식이 매우 이상적이다. 본 연구에서는 비교적 작은 크기의 석영으로 된 전구에 Ar 또는 다른 불활성 가스와 함께 황을 충전하고 이를 약 1 kW 출력을 갖는 magnetron을 이용하여 적당한 모양의 cavity 또는 도파관에서 방전하는 방식을 기본으로 하였다. 마이크로웨이브 오븐에 사용되는 출력 1 kW 내외의 2.45 GHz magnetron은 기술적으로 매우 발달되어 있고 수요도 많아 개당 가격이 매우 싸며 다양한 종류를 손쉽게 구할 수 있다. 다양한 종류의 마이크로웨이브용 공진기와 도파관도 비교적 쉽게 입수 할 수 있으며, 본 연구에 이용된 2.45 GHz대는 오래 전부터 공업적인 용도로 개발되어 있는 ISM 밴드에 속해 있다.

2.2 무전극 황 방전광의 분광분포

본 연구에서 사용된 전구는 지름이 약 40 mm이고 두께가 약 2 mm 인 석영(SiO₂)으로 만들어진 구형이다. 깨끗이 세척된 전구에 황 또는 황과 첨가물을 일정한 량 투입하고 Ar을 5 torr 정도 채운 후 산소-프로판 불꽃으로 밀봉하였다. 방전장치로는 황동 망사로 제작된 원통형 공진기가 이용되었으며, 입력되는 마이크로파 에너지를 전구에 집중시켜주는 역할을 한다. 고주파 발생장치로 2.45 GHz대의 마이크로파를 발생시키는 전자레인지용 마그네트론을 사용하였으며 마그네트론용 전원장치도 제작하였다.

전구에 입사 및 반사되는 마이크로파 전력을 측정하기 위하여 WR340 도파관형 방전 시스템을 제작하였다. 마그네트론에서 생성된 마이크로파는 도파관에 입력되어 directional coupler 와 slot을 거쳐서 공진기로 입력된다. Directional coupler에는 마이크로파의 입사전력(forward power)과 반사전력(reflected power)을 읽을 수 있도록 RF power meter를 부착하였다. 일부 반사된 마이크로파는 magnetron으로 돌아오지 않도록 하였다.

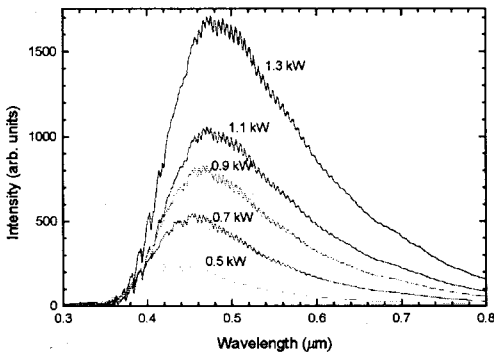


그림 2. 무전극 황전등의 마이크로파 입력전력을 0.5 - 1.3 kW로 변화했을 때 황 방전광의 분광분포

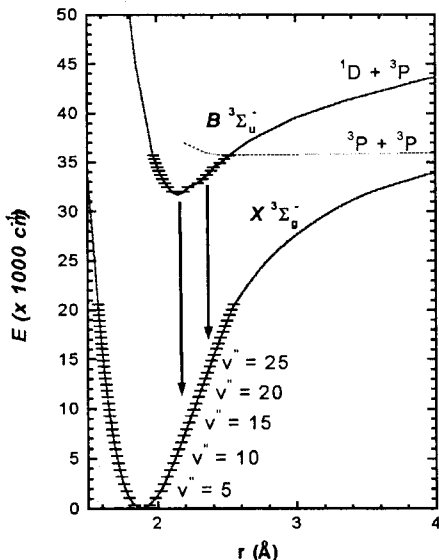


그림 3. Energy diagram for S₂

마이크로파로 여기된 무전극 황전등의 마이크로파 입력전력에 대한 분광광도 변화를 그림 2와 같이 측정하였다. 마이크로파 입력전력이 0.7 kW 보다 작을 때 방전광의 중심파장은 약 450 nm이고 푸른색을 띠는 백색광이다. 이원자 황의 에너지밴드 도표 (그림 3)에서 황증기(S₂)의 B³Σ_u⁻ 상태와 X³Σ_g⁻ 상태 사이의 에너지 차이가 자외선 영역에 가깝기 때문에 황 방전광의 발광 스펙트럼은 자외선 영역에서 발광중심을 가진다. 그러나 입력전력을 높여 황 증기가 적절한 밀도를 가지게 되고 황에 의해서 방출된 빛이 다른 황 분자를 여기하게 되면 여기된 분자는 최초 방출된 빛보다 파장이 같거나 더 긴 빛을 방출하게 된다. 이 과정을 여러차례 되풀이하면 발광효율은 떨어지나 그림 2와 같이 스펙트럼의 중심이 적색쪽으로 이동하게 된다. 또한 황 증기의 온도와 밀도가 적절히 유지되면 대부분의 황은 이원자 상태로 있을 확률이 커지기 때문에 선속을 가진 황 원자 스펙트럼은 억제되고 수많은 분자 선속이 중첩된 부드러운 모양의 황 분자 스펙트럼이 나오게 된다. 위와 같은 황은 특정한 방전조건 하에서 태양광과 유사한 색도를 갖는 연속적인 분광분포를 갖는 빛을 방출한다.

2.3 무전극 황전등의 효율과 연색지수

무전극 황전등은 발광효율이 (시각효능, luminous efficacy) 매우 높은 것으로 알려져 있다. 황전구에 봉입된 황의 질량을 달리하여 마이크로파 입력전력 변화에 대한 시각효능을 그림 4와 같이 측정하였다. 투입된 황의 질량이 적을 때는 약 15 lm/W 정도의 매우 낮은 시각효능 특성을 보였으나 봉입된 황의 질량이 20 mg 보다 크고 입력된 마이크로파 전력이 0.9 kW를 넘어서면 황전등의 시각효능은 100 lm/W에 도달한다.

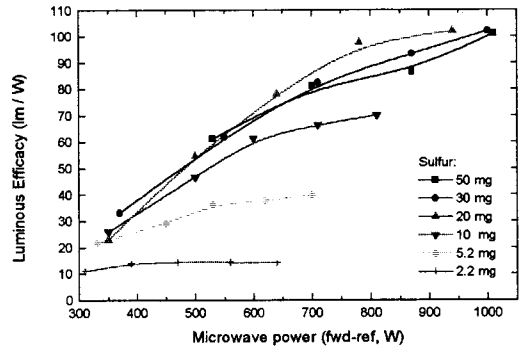


그림 4. 2.2 - 50 mg의 황이 봉입된 무전극황전등의 마이크로파 전력변화에 대한 시각효능 변화

개발된 무전극 황전등의 상관색온도(Correlated Color Temperature, CCT)를 조정하기 위하여 몇 가지 방법이 시도되었다. 그림 5는 제작된 무전극 황전등의 마이크로파 입력전력 변화에 대한 방전광의 CCT변화이다. 황 방전구를 정지상태에서 방전할 경우 상관색온도는 10,000 K 이상으로 매우 푸른색을 띠는 백색광이다. 그러나 같은 방전구를 일정한 속도로 회전 할 경우 방전하지 않는 황증기가 전구의 내벽으로 고르게 퍼지면서 전구 중심부에서 방출된 방전광의 자외선 영역 일부가 흡수된다. 결국 전구를 빠져나온 빛은 자외선이 거의 제거되고 분광분포의 중심부가 적색쪽으로 이동되어 방전구가 정지되어 있을 때보다 낮은 CCT를 갖는다[2].

방전광의 색도(상관색온도)를 조절하기 위한 다른 방법으로 Na, Li, K 화합물을 황과 함께 방전구에 넣어 방전하였다. 황과 NaI를 방전했을 때 방전광의 CCT를 더욱 낮출 수 있었으며 (그림 5) 임의로 원하는 상관색온도를 얻을 수 있었다[3].

황만 방전했을 경우 방전광의 연색지수 (Color Rendering index, CRI)는 70-85 이었으며, 동일한 방전구를 일정한 속도로 회전하였을 때 CRI는 마이크로파 전력에 따라 75-85로 높아졌다. 그리고 NaI를 첨가한 방전구의 CRI는 80-90으로 매우 높게 측정 되었다.

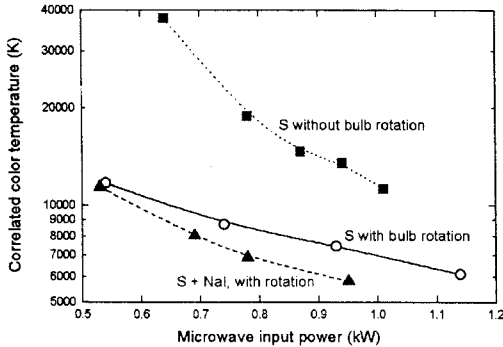


그림 5. 황방전구의 정지상태, 황방전구의 회전상태 및 황방전구에 NaI를 첨가하고 회전 할 때의 마이크로파 전력에 대한 상관색온도 변화

2.3 전구의 온도와 깜박임

그림 6은 석영으로 제작된 방전구의 표면 온도를 보여주는 적외선 사진으로서 방전시 가장 뜨거운 부분의 온도는 약 900°C에 가까움을 알 수 있다.

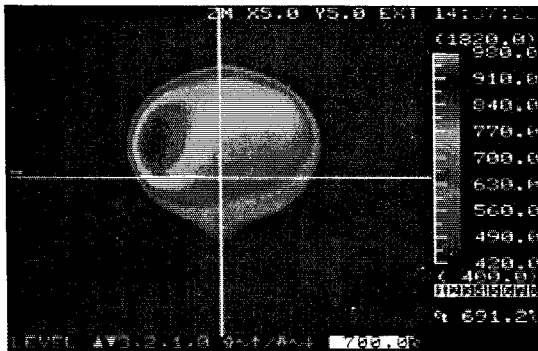


그림 6. 사용중인 황전등의 적외선 온도 분포

본 실험에 사용된 magnetron은 전파 정류된 고압을 사용하여 2.45 GHz의 고주파를 발생한다. 그림 7은 방전등이 점등되어 평형상태를 유지할 때의 고압 전류 파형과 광 검출기로 측정된 방전광 세기의 파형이다. 무전극 황전등에서 방출된 빛은 마그네트론의 고압전류 파형에 동기 되어 120 Hz로 깜박이는 것을 알 수 있다.

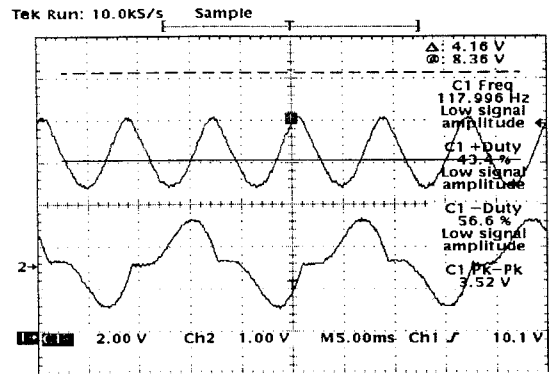


그림 7. 방전광의 깜박임(위)과 마그네트론 전류 파형(아래). 방전광의 세기는 120 Hz로 정확히 전류부의 전력에 동기화 되어있음을 알 수 있음

3. 결 론

국내 최초로 마그네트론을 이용한 마이크로파 여기형 무전극 방전등 및 방전장치를 제작하여 방전시 일어나는 여러 가지 특성을 조사하였다. 마이크로파로 여기된 이원자 황에서 방출된 빛은 가시광선 영역에서 연속적인 분광분포를 가지며, 발광 효율은 100 lm/W 이상이었다. 방전구의 회전과 황 이외의 첨가물을 이용하여 전등의 상관색온도를 조정할 수 있었으며, 이때 CRI는 80-90을 유지 할 수 있었다. Magnetron으로 여기된 무전극 황전등의 방전광은 마그네트론에서 발생된 고주파전력 변화에 동기되어 변화였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 구선근, 박기준, 김진중, "무전극황전등 연구개발 중간보고서," TM95YS27, 1998. 한국전력공사 전력연구원, 1998.
- [2] 구선근, 박기준, 추장희, "이원자황의 자기흡수효과에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 1999, 출간예정
- [3] 구선근, 박기준, 추장희, "메탈할라이드를 첨가한 무전극 황전등의 분광분포 변화," 대한전기학회 논문지, 1999, 출간예정