

무전극 황방전등에서 고압 이원자 황(S₂)의 자체 역전 효과

論 文
49C - 11 - 4

Self Reversal Effect of the High-pressured Diatomic Sulfur in the Electrodeless Sulfur Discharge Lamp

秋長姬* · 具禪根** · 朴基濬*** · 李永雨[§]

(Jang Hee Chu · Goo Sun-Geun · Kijun Park · Youngwoo Yi)

Abstract - A prototype electrodeless sulfur lamp was developed and investigated the spectroscopic characteristics. The emission spectra of S₂ in the microwave-discharged electrodeless sulfur lamp (ESL) were studied at various input power. The emission spectra of the ESL shift to longer wavelength with increasing of the input power. We have shown that this is due to the self reversal effect in the high pressure gas discharge. We also show that the self reversal effect increases as the rotation of the discharged bulb. The spectral distribution of the ESL shifts about 45 nm toward visible region from UV region due to the rotation of the lamp bulb.

Key Words : 자체 역전 효과(self reversal effect), 이원자 황(diatomic sulfur; S₂), 무전극 황전등(electrodeless sulfur lamp), 마이크로파 방전(microwave discharge), 분광분포(spectral distribution)

1. 서 론

날로 증가하는 에너지 소비량을 감당하기 위하여 한정된 에너지 자원을 최대한 이용하기 위하여 에너지 소비 합리화 기술 확보 일환으로 조명분야에서 고효율 조명기기의 개발이 필요하다. 최근 개발되고 있는 무전극 전등은 고효율, 장수명의 특징을 갖는 21세기 전등으로 주목을 받고 있다. 일반적으로 무전극 전등은 전구 내부에 필라멘트나 전극이 없고, 전구 외부의 여기 코일이나 마그네트론 등에서 발생한 전자파를 직접 발광물질에 인가하여 ohmic heating 함으로써 방전시키고, 이때 발생하는 빛을 조명으로 사용하는 기기이다. 무전극 전등의 구조는 전자파 발생장치와 이를 위한 전원 및 제어장치, 전구 그리고 발생된 전자파가 전구 외부로 새어나감을 방지하는 전자파 차폐장치 등 크게 네 부분으로 구성된다.

무전극 전등은 1880년대부터 꾸준히 연구되어 왔으나, 조명기기로 실용화되지는 못하였다[1]. 그러나 트랜지스터 발명 이후 무전극 전등에 필요한 여러 전력소자들이 개발되고 EMI(electromagnetic interference) 기술의 발전으로 무전극 전등에서 나오는 전자파를 제어할 수 있게 됨으로써 이 분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 무전극 전등 중에서 마이크로파로 방전하는 무전극 황전등은 1994년에 미국 Fusion Lighting 회사에서 3.4 kW급의 마이크로파로 방전하

는 '무전극 황 방전등'을 처음 발표한 후, 1996년 말부터 일부 주문 판매에 한정적으로 시험용 1 kW급 무전극 황전등을 출시하였다.

국내의 무전극 전등의 연구는 1996년부터 한전 전력연구원에서 연구 개발하여 시제품을 제작하였다[2,3]. 무전극 황전등은 고전압 전원에 의해 구동되는 마그네트론에서 발생한 2.45 GHz의 마이크로파 출력으로 전구에 봉입된 이원자(S₂) 황을 방전시키고, 이때 발생하는 방전광을 조명으로 사용하는 전등으로, 시감효능이 164 lm/W_{MW} 의 높은 발광효율과 80 이상의 평균 연색평가수를 구현하였다. 이러한 전등의 용도는 수만 lm의 높은 조도와 일반 전등에 비해 4배 이상의 긴 수명을 가지므로, 장기간 고조도의 조명이 필요한 장소와 사람이 접근하기 힘든 장소에 편리하게 사용할 수 있으며, 가로등, 등대, 탐조등(searchlight) 및 야외 행사장 조명 등 야외 조명과 대형건물 및 공장의 실내 조명, 양계장, 온실 등의 농업용, 그리고 공업용으로 잉크 및 접착제의 건조 등에 이용할 수 있다.

조명은 일상생활과 인간의 감성에 큰 영향을 미치며 인간에게 안락하고 자연스러운 느낌을 줄 수 있는 조명광의 품질과 유지 보수의 편리함이 높은 에너지 효율 못지 않게 중요한 요건이다. 무전극 황 방전등은 고효율과 높은 평균 연색평가수를 나타내지만 상관색온도가 5600 K 이상으로 차가운 느낌을 주는 푸른색 또는 녹색을 띤 백색광으로, 일반 조명으로 사용하기 위해서는 방전광의 분광분포를 조절하여 자연광과 비슷하게 상관색온도를 낮게 조절할 필요가 있다.

전등의 상관색온도를 가변하는 기술과 평균 연색평가수를 향상시키는 방법으로 방전구의 회전, 방전전력과 압력의 조정 및 Na 등의 첨가의 방법 등을 개발하였으며, 첨가물질

* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員 · 理 博
** 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 補 研 究 員
*** 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員 · 工 博
[§] 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 補 研 究 員
接受日字 : 1999年 9月 2日
最終完了 : 2000年 10月 20日

을 이용하여 저 입력전력에서도 상관색온도를 조절하는 방법을 개발하였다[4]. 저압(low pressure)에서 황을 방전시키면 방전광은 380 nm에서 중심파장을 가지며 270 nm에서 680 nm 사이의 폭 넓은 파장범위에서 방전광이 발생한다[5,6]. 그러나 고압(high pressure)에서 황을 방전시키면 350 nm 이하의 분광분포가 크게 줄어들어, 전체적으로 방전광의 분포가 가시광선 영역으로 이동하는 특성을 나타낸다[7].

본 논문에서는 방전광의 상관색온도와 연색성 평가수를 증가시키기 위하여 황 방전광의 분광분포의 자외선을 줄이고 가시광선 영역으로 이동하는 방법으로, 방전구의 회전과 방전구의 입력전력을 조절하였으며, 이 때 방전광의 특성을 조사하여 스펙트럼 변화의 원인을 설명하였다.

2. 실험장치

입력전력에 대한 황방전광의 분광분포를 측정하기 위하여 WR340 도파관 연결형 방전장치를 그림1과 같이 구성하였다. 실험에 사용한 방전구는 지름 40 mm의 석영구로 제작하였으며, 순도 99.99%의 황 20 mg과 buffer gas로 99.999% Ar 기체를 수 torr의 압력으로 채웠다. Buffer gas인 Ar 가스는 마이크로파 에너지를 흡수하여 먼저 플라즈마 상태가 되어 낮은 전압에서 방전을 일으키고, 황증기의 방전 전압을 낮추는 효과가 있으며, 방전구 안에서 저전력에서 방전이 균일하게 일어나게 하는 역할을 한다. 제작된 전구는 그림 1의 WR340 도파관 연결형 방전장치의 공동 중심부에 장착하였다. 방전공동(discharge cavity)으로 금속망으로 제작된 원통형 공동이 이용되었으며, 입력되는 마이크로파 에너지를 전구에 집중시키는 역할을 한다.

저전력 구동 전등의 특성을 관찰하기 위하여 RF signal generator에서 발생된 2.45 GHz 연속 마이크로파를 Travelling Wave Tube amplifier (그림 1 좌측상단)에서 100 W에서 350 W까지 증폭시켜 WR340 규격의 도파관에 launcher를 통해 입력시켰다. 400 W 이상의 높은 입력전력에서 방전광의 분광분포를 측정하기 위하여 전자레인지용 마그네트론(그림 1 좌측하단)을 사용하였으며 이를 위한 전원장치를 제작하였다. 마그네트론에서 발생한 마이크로파는 방전시스템에 장착한 launcher를 통해 인가되며, 인가된 마이크로파는 isolator와 directional coupler를 통과하여 황동망으로 이루어진 공동내부로 입력된다. 이때 moving short circuit을 이용해 도파관-공동 사이의 임피던스를 정합하며 입력된 마이크로파 전력은 directional coupler의 진행과 측정용 단자를 통해 전력계에서 측정한다. 공동에 인가된 마이크로파 전력의 대부분은 공동 내부에 장착된 방전구 내 물질을 방전시키는데 사용되고 일부는 반사되어 directional coupler를 거쳐 isolator에서 흡수되어 제거된다. 반사된 마이크로파 전력은 directional coupler의 반사파 측정용 단자를 통해 전력계에서 측정되며 방전구에 흡수된 마이크로파 전력은 측정된 입사전력과 반사전력의 차이이다. 장착된 방전구는 전구표면 특정부분의 온도 상승을 줄이고 황을 균일하게 방전시키기 위해 일정한 속도로 회전할 수 있는 구조를 갖추었다. 공동에 장착된 방전구의 회전축은 중력방향에 수직이며, 실험장치가 설치된 광학테이블과 수평이다.

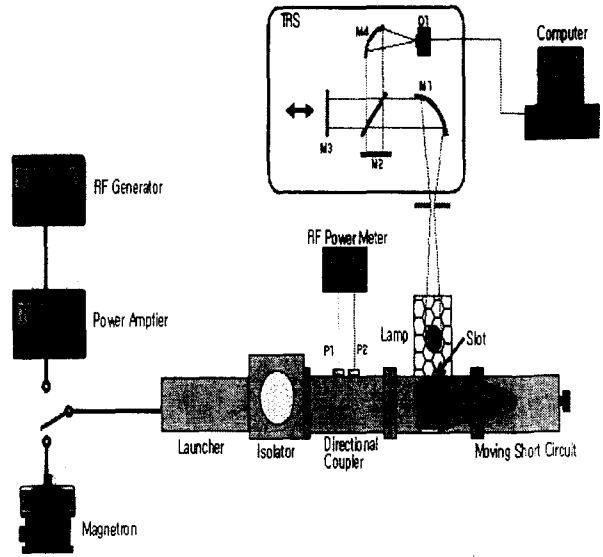


그림 1. WR340 마이크로파 무전극 방전시스템. M1, M2, M3, M4 : 거울, P1: 입력전력 측정단자, P2: 반사전력 측정단자. Fig. 1. WR340 microwave electrodeless discharge system.

방전구에서 방출되는 자외선에서 근적외선 사이의 방전광 분광분포는 실리콘 광검출기가 장착된 시분해 FT 분광기 (Time Resolved Fourier Transform Spectrometer; Bruker co, Model IFS 66v/S)를 이용하여 47400 cm⁻¹ (210 nm)에서 8300 cm⁻¹ (1,200 nm) 사이의 파장범위에서 0.2 cm⁻¹ 또는 2 cm⁻¹의 분해능으로 측정하였으며, 휘도, 방사휘도, 상관색온도 및 평균 연색성평가수 등은 colorimeter(PR-650, Photo Research)와 교정된 감쇄기를 이용하여 2° 시야에서 측정하였다. 그림 2는 황전등의 방전 모습을 나타낸 그림이며, 전구 주변에 계측기와 측정단자들이 나타나 있는 것이 보인다.

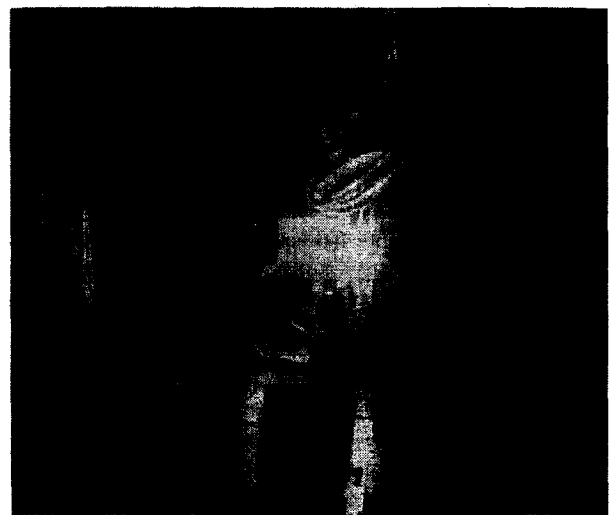


그림 2. 황방전등의 방전 모습. Fig. 2. Photograph of the sulfur lamp discharge.

3. 실험결과

3.1 황의 흡수 특성

먼저 황의 흡수 특성을 조사하기 위하여 석영 방전구에 일정량의 분말 황을 봉입하고 온도를 변화시키면서 투과도를 조사하였다. 황은 분말상태에서 온도를 증가시키면 113℃ 이상에서 연황색의 액체상태를 거쳐 전이 온도 160℃ 정도에서 S₈ 환(ring) 상태로 되고, 그 이상의 온도에서 S₈ 고리(chain) 상태나 황의 다중합체(polymer)로 된다. 증기상태의 황 분자는 2개 이상 8개의 황 원자로 구성된 S₈, S₇, S₆, S₅, S₄, S₃, S₂ 분자상태로 존재하며, 400 K 이하 온도에서의 안정한 상태는 황 원자 8개로 구성된 S₈ 이다. 그러나 900 K 이상 일 때 황 증기는 황의 평균 진동에너지에 해당하는 약 0.08 eV의 열에너지에 의해 S₈이 분해되어 대부분 S₂로 변한다.[6]

그림 3은 온도변화에 대한 황 증기의 투과(흡수) 특성을 측정한 그림이다. 그림에서 보면 450 K에서는 300 nm 보다 긴 파장의 광은 거의 투과한다. 그러나 온도가 증가함에 따라 자외선영역에서 흡수가 일어나 투과광의 파장은 점점 더 긴 파장으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 투과광이 100% 넘게 나타나는 것은 물질에서 발광하는 현상을 의미한다. 그림 3에서 600 K에서는 350 nm까지 흡수가 일어나며, 온도가 더 증가하여 900 K에서는 550 nm 까지도 거의 다 흡수하는 것을 보여주고 있다. 이 경우에는 방출광의 더 장파장에서 일어나는 것을 알 수 있다.

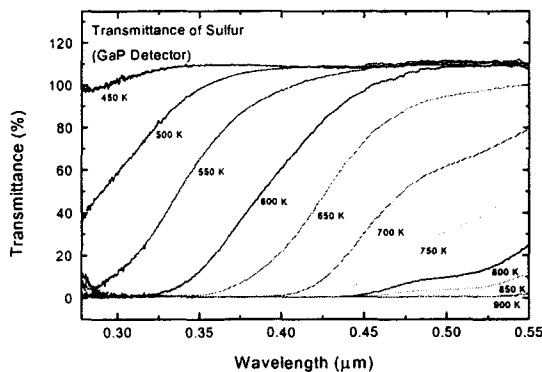


그림 3. 온도 변화에 대한 황 증기의 투과 스펙트럼.
Fig. 3. Transmittance of sulfur vapor at various temperatures.

특히 전기 방전으로 황을 증기로 변화시킨 경우 방전에 의해 발생하는 전자는 수 eV 이상의 높은 에너지를 가질 확률이 높으므로 S₈을 쉽게 분해할 수 있으며, 900 K 이하에서도 S₂를 쉽게 형성한다. 일정한 부피의 황 방전구의 온도가 올라가면 황의 증기압이 증가되고 방전구 안의 S₂ 분자수를 증가하게 되어 압력이 높아지게 된다. 그러므로 900 K 이상에서는 방전구 안의 황이 대부분 S₂로 변하며, 전구내의 압력은 1 기압 이상으로 높아질 것으로 예상된다. 황 증기의 흡수특성은 온도가 높아질수록 장파장까지 흡수하는 특성을 보였으며, 이것으로부터 고압(high pressure) S₂는 자외선을 거의 흡수하는 특성을 가짐을 확인하였다.

3. 2 낮은 입력전력에서의 황 방전광의 특성

황 방전구의 방전광의 특성을 입력전력의 변화에 대하여 조사하였다. 황 방전구의 스펙트럼이 입력전력이 증가하면 방전광의 분광분포가 자외선영역의 광이 줄어들고 가시광 영역으로 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 원인을 밝히기 위하여 황 방전구의 입력전력의 변화에 대한 방전광의 스펙트럼 변화를 조사하였다. 먼저 연속 마이크로파 발생기를 이용하여 방전구의 입력전력이 400 W이하일 때 황 방전광의 스펙트럼을 조사하였다. 그림 4는 연속 마이크로파의 입력전력을 100 W에서 350 W까지 변화하여 황방전등의 방전 분광분포를 측정한 결과를 보인 것이다. 그림에서 S₂의 분자 전이선(molecular transition line) 진동준위(vibrational level)의 구조가 나타나는 것을 볼 수 있다. 황의 발광 메커니즘은 이원자 황의 여기된 상태인 B³Σ 상태에서 기저상태인 X³Σ 상태로 전이하면서 발광한다.[6] 각 전이선은 각 전자상태에 진동준위가 중첩된 부 구조를 가진다. 스펙트럼에서 진동준위 전이선의 선폭이 넓게 나타난 것은 기체의 압력과 온도에 의해 비균질 선폭 확대가 일어난 결과이다.[8] 진동준위의 스펙트럼 모양을 살펴보면 방전구의 입력전력이 증가하면서 스펙트럼의 피크의 앞쪽과 뒤쪽의 모양이 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 스펙트럼의 피크에서 가파르게 변하는 부분을 머리(head)로, 느리게 변하는 부분을 꼬리(tail)로 부르기로 하겠다.

그림 4에서 입력전력이 100 W 일 때와 150 W일 때는 S₂의 분자 전이선의 머리는 단파장 쪽에, 꼬리는 장파장 쪽에 위치하며, 이는 다른 그룹에서 측정한 황의 저압방전(low pressure discharge)에서 발생하는 전형적인 방전광의 분광분포와 일치한다[6]. 그러나 입력전력이 200 W부터 스펙트럼의 모양이 변화하기 시작하여 250 W에서는 스펙트럼의 피크가 줄어들면서 머리와 꼬리의 방향이 바뀌기 시작해서 입력전력이 300 W 이상일 때는 꼬리가 단파장 쪽에, 머리가 장파장 쪽에 위치한 것을 확인할 수 있다. 이것을 자세히 비교하기 위하여 그림 5에 150 W와 300 W 일 때의 분광분포만을 비교하여 나타냈다. 그림 5에서 입력전력이 150 W 일 때의 피크를 위로 솟은 모양의 분광분포로 생각하면, 입력전력이 300 W 일 때의 피크는 아래로 솟은 모양의 분광분포로 생각할 수 있고, 이것은 정확히 두 분광분포의 피크 위치가 일치하며, 180° 역전한 모양임을 알 수 있다.

이 변화를 더 자세히 알아보기 위하여 S₂ 방전 스펙트럼에서 진동준위 전이선 하나를 선택하여 입력전력을 100 W, 150 W, 200 W로 변화시킨 스펙트럼을 그림 6에 비교하여 보였다. 입력전력이 100 W와 150 W일 때의 분광분포는 변화가 없었으며, 200 W에서는 분광분포의 모양이 변하기 시작하는 것을 볼 수 있다. 150 W까지는 발광선의 head가 단파장 쪽에, 꼬리가 장파장 쪽에 있는데, 200 W에서의 발광선 모양은 단파장의 스펙트럼 세기가 줄어들며, 장파장의 스펙트럼 세기가 증가하기 시작하는 것을 보여 주고 있다. 그림 4에서 보면 300 W 일 때의 스펙트럼은 머리와 꼬리가 완전히 역전해 있는 것을 볼 수 있었다. 따라서 입력전력이 300 W 이상에서 방전을 일으킬 때는 방전구의 압력이 높아서 고압상태의 방전특성을 보이며, 방전스펙트럼이 저압방전일 때와는 반대로 역전되어 있음을 알았다.

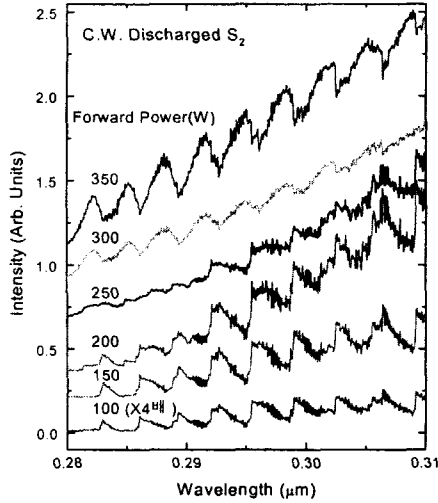


그림 4. 낮은 입력전력에 대한 황방전광의 분광분포.
 Fig. 4. Spectral distribution of the sulfur discharge lamp at various low input power.

전 특성을 보이지만, 300 W 이상의 전력이 인가되면 방전구의 온도가 증가하여 고압 황방전 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

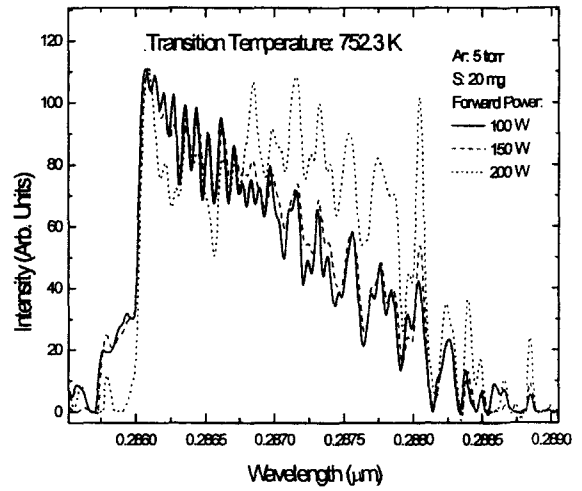


그림 6. 황의 진동준위 스펙트럼.
 Fig. 6. Spectrum of a vibrational level of S₂.

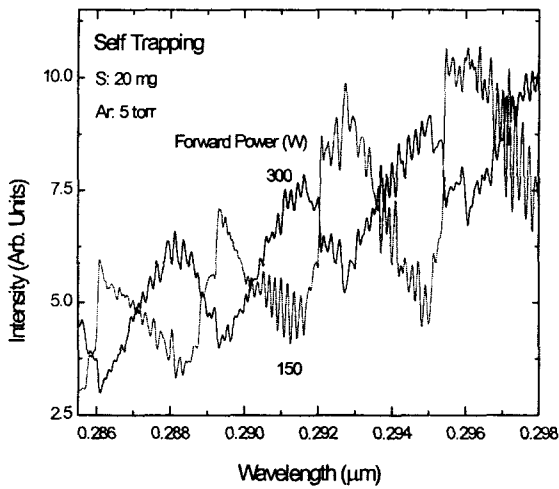


그림 5. 150 W, 300 W에서의 황방전 스펙트럼.
 Fig. 5. Sulfur discharge spectra.

황 방전구 안에서 황 분말은 마이크로파 에너지를 흡수하여 황 증기로 되어 S₂ 분자를 만들고 이후에 방전이 일어난다. 입력전력이 150 W 이하로 낮은 경우에는 방전구 안에 들어 있는 황 증기의 양이 적어서 비교적 낮은 압력 상태이지만 입력전력이 증가할수록 방전구내에는 온도가 상승하여 황 증기의 양이 증가하게 되어 압력이 높아지게 된다. 그러므로 150 W에서의 방전 스펙트럼은 전형적인 저압 S₂의 방

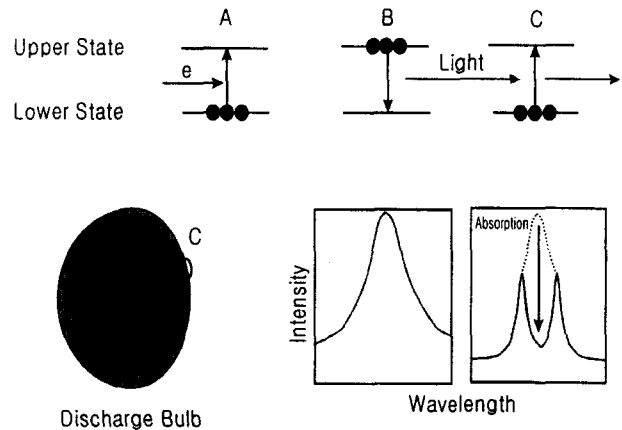


그림 7. 자체 역전 효과 설명. (A: 여기과정, B: 방출과정, C: 재흡수과정)
 Fig. 7. Illustration of the self reversal effect.
 (A: Excitation process, B: Emission Process, C: Reabsorption Process)

분광스펙트럼에서 자체 역전 효과(self reversal effect)란 발광하는 물질이 방출광의 일부를 재흡수하여 발광스펙트럼에 구멍이 생기는 현상을 말하며, 자체흡수효과(self absorption effect)라고도 한다[9]. 방전구 안에 압력이 높을 때에는 입력에너지를 흡수하여 기체 전체가 방전을 일으키는 것이 아니라 방전하지 않는 기체도 존재할 수 있다. 이 원리를 좀더 자세히 설명하면 그림 7에서와 같이 방전구 벽 근처에 머무르는 기저상태에 있는 차가운 황 증기가 외부로부터 에너지를 받아 높은 에너지를 가지게 된 전자와 비탄성 충돌

을 하면서 여기상태가 된다(그림 7의 A 상태). 여기된 황 증기는 여기상태의 유효 수명시간(effective life time) 동안 방전구의 내부로 확산된 뒤 방전광을 방출하고 기저상태로 돌아온다(그림 7의 B 상태). 그리고 방전구의 벽 근처에 있는 기저상태의 차가운 황 증기에 의해 방전광의 자외선은 재흡수 되어 방전구 밖으로 나오지 못한다(그림 7의 C 상태). 이때의 방전광의 분광분포는 재흡수가 일어난 부분은 분광분포에서 줄어들게 되는데, 재흡수가 일어나는 파장은 방전에 기여하는 S₂의 흡수특성에 의해 자외선영역에서 일어나게 된다. 이러한 자체 역전은 황 증기의 밀도가 높은 고압 방전에서 일어나며, 자체 역전에 의해 자외선 영역의 방전광은 재흡수 되어 방전구에서는 350 nm 이상의 파장의 방전광이 나오게 된다. 그러나 방전구 안이 저압 상태일 때에는 방전구 안에 S₂가 적으며 재흡수 현상이 거의 나타나지 않으므로, 방전스펙트럼의 특성은 방전광의 전 파장이 그대로 방전구 밖으로 방출한다.

황 증기의 방전광의 스펙트럼이 역전되는 온도를 V. E. Merchant와 M. L. Andrews의 실험결과를 이용하여 구하여 보았다. 이들은 황이 고압(high pressure)으로 방전할 때 $B^3\Sigma_u^-(v'=8)$ 에서 $X^3\Sigma_g^-(v''=0)$ 로 전이되는 진동 전이 피크(vibrational transition peak)의 반치폭 $\Delta\lambda$ 를 스펙트럼에서 구하여 식(1)과 같이 표현되는 식에 대입하여 황 증기의 회전 온도(rotational temperature)를 구하였다[10].

$$T = 565\Delta\lambda - 123 \quad (1)$$

T : 회전 온도(Rotational temperature) (K)

$\Delta\lambda$: 진동 전이 피크(Vibrational transition peak)의 반치폭 (nm)

그림 6에서 진동 전이 피크의 반치폭 $\Delta\lambda$ 는 1.35 nm로 이 값을 식(1)에 대입하여 얻은 황 증기(S₂)의 회전 온도 T는 752.3 K 이었다. 따라서 본 실험에서는 방전구의 입력전력이 150 W 이하에서는 자체 역전이 일어나지 않는다고 볼 수 있으며, 그림 6과 같이 $B^3\Sigma_u^-(v'=8)$ 에서 $X^3\Sigma_g^-(v''=0)$ 진동전이에서 752.3 K 이상에서 자체 역전이 시작되는 것을 알 수 있다. 특히 입력전력이 100 W 일 때와 150 W 일 때 피크의 반치폭에 큰 차이가 없었으며, 이 영역에서는 방전구 내 황 증기가 S₂ 상태로 변하여 방전을 일으키는 상태임을 짐작 할 수 있었다.

3.3 높은 입력전력에서의 황 방전광의 특성

황 방전등을 실제로 작동시키는 kW급의 입력 전력에서의 방전광의 특성을 조사하여 분석하였다. 입력전력을 1.3 kW로 황을 방전시키고, 이때 발생하는 방전광의 분광분포를 시분해 분광기로 측정하였다. 그림 8에서 가로축은 파수(wavenumber)를 나타내며, 세로축은 시간, 높이는 방전광의 세기를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 방전광의 자체역전효과를 자세히 관찰하기 위하여 방전광의 시분해 스펙트럼을 살펴보면, 수 십 초동안 방전이 개시되기 시작하여 방전이 개시된 후 잠시 동안 자외선이 방출되다가 곧 사라지는 것을 볼 수 있다. 방전이 지속되는 동안은 27500 cm⁻¹ 이상 (350

nm 이하)의 빛은 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 방전초기에 저압 S₂ 상태에서 자외선이 방출하다가 곧 방전구 안이 고압상태가 되어 방전구 내에 존재하는 S₂에 의해 자외선이 자체 흡수되어 스펙트럼이 자체 역전되는 것을 확인 시켜주는 결과이다.

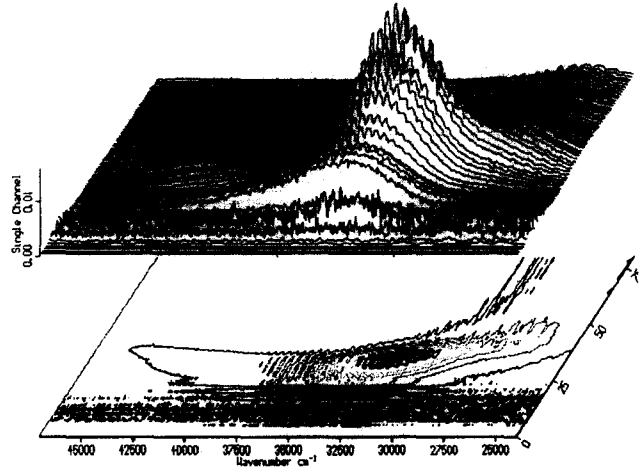


그림 8. UV 영역의 시분해 황방전 스펙트럼 (3 s/trace), Power (Fwd - Ref) = 1.0 kW.
Fig. 8. Time-resolved discharge spectra for UV region (3 s/trace), Power (Fwd - Ref) = 1.0 kW.

입력전력을 0.45 kW에서 1.3 kW까지 증가시키면서 측정 한 황 방전광의 스펙트럼을 그림 9에 나타냈다. 마그네토론을 이용하여 펄스 마이크로파 입력전력을 0.45 kW 로 방전시킬 때의 분광분포는 저압에서의 황 방전광의 전형적인 분자전이선의 구조를 보이며, 입력전력이 증가함에 따라 단파장 영역의 발광세기가 급격히 줄어드는 것은 물론, 각 분자전이선의 피크의 머리와 꼬리의 위치가 바뀌었다.

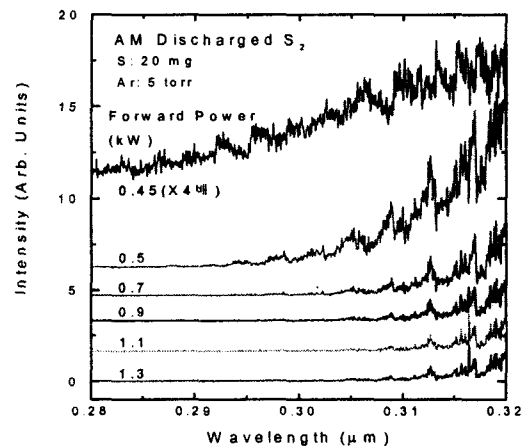


그림 9. 높은 입력전력에 대한 황의 분광분포.
Fig. 9. Spectral distribution of the discharged sulfur at high input power.

또한, 입력전력이 0.9 kW 이상에서는 자체역전효과가 거

의포화됨을 볼 수 있다. 그러므로 500 W 이상의 마이크로파 전력으로 방전시키는 황전등의 전구 안은 350 nm 이하의 자외선이 거의 방출되지 않으며 일반 조명으로 사용하기에 적당한 분광분포를 보였다.

3.4 방전 전구의 회전 효과

그림 10은 황방전구를 1.3 kW로 방전시킬 때 분광분포의 회전에 의한 특성을 보인 것이다. 황 방전구가 정지해 있을 때 방전모습을 살펴보면 사방으로 균일하게 방전을 일으키지 않고, 중력방향으로 방전이 균일하게 일어나지 않는 것을 육안으로 관찰하였다. 균일한 방전을 얻기 위하여 방전구를 회전시켰으며, 회전하지 않을 때와 비교하여 사방으로 균일하게 방전이 일어나는 것을 확인하였고, 방전광의 분광분포의 피크는 장파장 쪽으로 약 45 nm 정도 이동하는 특성을 보였다.

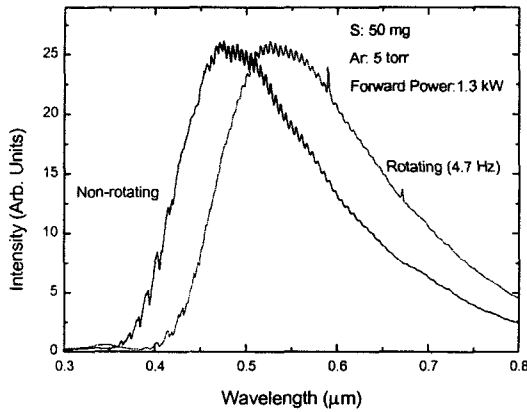


그림 10. 회전하는 전구의 황 방전광의 분광분포.
Fig. 10. Discharge spectral distribution of the rotating discharge bulb.

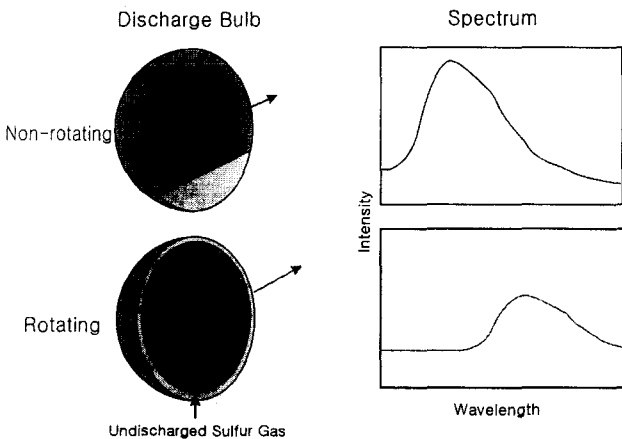


그림 11. 전구의 회전효과를 설명하는 그림.
Fig. 11. Illustration of the rotation effects of the discharge bulb.

정지된 방전구 안은 그림 11과 같이 방전에 기여하지 않는

S₂가 존재하며, 기저상태의 차가운 S₂는 바닥에 깔려 있음을 육안으로 확인하였다. 그러나 전구를 회전시키면 원심력에 의해 바닥에 깔린 S₂가 사방으로 골고루 퍼지게 되며, 방전광이 전구 밖으로 방출할 때 전구벽 근처에서 기저상태의 S₂를 만나 흡수를 하여 스펙트럼에 자체역전을 효과적으로 일으키게 하는 것을 알았다. 그러나 1.3 kW 이상의 높은 입력전력에서 방전시킬 때는 회전에 의한 효과가 거의 나타나지 않음을 확인하였다. 입력전력이 높은 경우에는 방전구의 온도가 매우 높아서 전구 내에 있는 S₂가 열적운동으로 방전구에 균일하게 퍼지게 되므로 회전에 의하지 않고서도 S₂ 분자를 골고루 퍼지게 하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력연구원에서 개발한 마이크로파 여기형 무전극 황 방전등에서 일어나는 S₂의 방전 분광분포를 분석하여 설명하였다. 개발된 무전극 황전등의 상관색 온도를 조절하기 위하여 전구의 입력전력과 전구를 회전하는 방법을 연구하였다. 전구의 회전에 의해서 방전광의 분광분포를 약 45 nm 정도 장파장쪽으로 이동할 수 있었으며, 저압 S₂의 방전광에 비해 고압 S₂ 방전광은 자외선 강도가 줄어들며 가시광 영역으로 분광분포를 이동하였다. 이 원인을 고압 기체 방전에서 일어나는 자체역전 효과임을 설명하였으며, 방전구의 회전에 의해 자체역전효과를 더욱 증가시킴을 알았다. 따라서 실제 황방전등을 사용할 경우 높은 전력에서 방전시킬 경우에는 자체역전효과 때문에 방전광의 상관색온도가 낮으나, 적당한 광출력의 방전광을 얻기 위해서는 낮은 방전전력에서도 균일한 방전 상태와 상관색온도를 얻기 위하여 전구를 회전시켜주는 방법이 효과적이며, 다른 첨가물질을 봉입하여 방전전력을 낮추는 방법과 혼합하여 사용할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] B. P. Turner, M. G. Ury, Y. Leng, and W. G. Love, "Sulfur Lamps-Progress in Their Development", J. Illuminat. Eng. Soc., Winter 1997, pp.10-17.
- [2] F. M. Rubinstein, S.M. Berman, R. D. Clear, D. Crawford, W. Ferguson, C. Greene, C. Gabor, O. C. Morse, T. Orr, M. Packer, C. Praul, M. J. Siminovitch, G. J. Ward, and C. Zhang, "Lighting Systems," Energy & Environment Division LBL, Building Technologies Program 1994 Annual Report, LBL-36553, p.18, 1994.
- [3] 박기준, 추장희, 구선근, 이영우, "무전극 황전등 연구개발 최종보고서, TR.95YS27.S1999.341, 1999.
- [4] 구선근, 박기준, 추장희, "전구내 NaI 첨가에 의한 무전극 황전등의 특성 변화",

- 대한전기학회 논문지 Vol.48C, pp724-729, 1999.
- [5] J. M. Ricks and R. F. Barrow, "The dissociation energy of gases diatomic sulfur", Can. J. Phys. Vol.47, pp.2423-2427, 1969.
- [6] D. A. Peterson and L. A. Schlie, "Stable pure sulfur discharges and associated spectra," J. Chem. Phys. **73**(4), pp.1551-1566, 1980.
- [7] J. T. Dolan, M. G. Ury and C. H. Wood, "Lamp Including Sulfur," US Patent 5404076 (1995).
- [8] Sune Svanberg, "Atomic and Molecular Spectroscopy", 2nd edition, Springer Series on Atoms and Plasmas(Springer, Berlin, 1992), p.85.
- [9] D. Karabouriotis, "Self-Reversal Emission Lines in inhomogeneous plasmas" in *Radiative Processes in Discharge Plasmas*, ed. by Joseph M. Proud and Lawrence H. Luessen, Plenum Press, New York and London, 1985, p. 171.
- [10] V. E. Merchant, M. L. Andrews, "Technique for Measuring Rotational Temperature of Microwave Excited Diatomic Sulfur," Appl. Opt. **19**(18), pp.3113-3117, 1980.

저 자 소 개



추 장 희 (秋長姬)

1985년 연세대학교 물리학과 졸업. 1992년 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5886, Fax : 042-865-5844
E-mail : jhchu@kepri.re.kr



박 기 준 (朴基濬)

1968년 생. 1991년 인하대학교 공대 응용물리학과 졸업. 1993년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년 Univ. of Central Florida, 전기전자공학과 졸업(공학). 1996 - 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.
Tel: 042-865-5895, Fax : 042-865-5804,
E-mail : killer@kepri.re.kr.



구 선 근 (具禪根)

1967년 10월 16일 생. 1986년 연세대 물리학과 졸업. 1994년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원
Tel : 042-865-5896, Fax : 042-865-5844
E-mail : freeon@kepri.re.kr