

마이크로파 방전에 의한 Sulfur와 NaI의 광학적 특성

이종찬, 황명근\*, 박대희  
원광대학교 전기전자 및 정보공학부, \*한국조명기술연구소

Optical Properties of Sulfur and NaI by Microwave Discharge

Jong-Chan Lee, Myung-Keun Hwang\*, Dae-Hee Park  
School of Electrical, Electronic and Information Engineering, Wonkwang University  
\*Korea Institute of Lighting Technology

**Abstract** - The fundamental principles of the operation of microwave discharges that are used to convert microwave energy to broad spectrum visual light are known. In this paper, emission dependance of microwave discharges in mixture content of sulfur with noble gases was studied. It is shown that the excitation of this gaseous mixture is carried out in two phases: (1) ionization of noble gas atoms by a microwave field and (2) the consequent maintenance of slightly ionized nonequilibrium plasma by the field. These two processes have essentially various thresholds for the microwave pump. The purpose of this work is to investigate spectral properties of the high frequency discharges in a mixture sulfur vapors with noble gases.

도에서도 S<sub>2</sub>로 쉽게 분해된다.

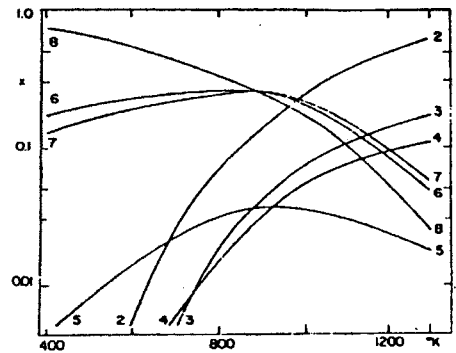


그림 1. 대기압에서 황 증기의 온도변화

1. 서 론

초고주파 방전의 기본적인 동작원리를 갖는 무전극 황 램프는 2.45GHz의 초고주파 에너지를 광대역의 가시광선으로 변환시킨다. 무전극 황 램프는 에너지 효율, 광의 품질, 유지보수 특성, 환경친화적 측면에서 우수한 조명 기구로 평가받고 있다. 특히 Fusion Lighting 사의 800watts급 무전극 황 램프는 효율이 99 lm/W로 메탈 할라이드 램프보다 연색지수 및 수명 등의 특성에서 우수함을 나타냈다(1).

기본적인 무전극 황 램프의 발광 메카니즘은 황과 아르곤 가스가 들어 있는 quartz 볼을 차폐용 금속망 공진기에 위치시키고 2.45 GHz 초고주파를 인가한다. 초고주파 에너지의 인가에 의해 아르곤 가스가 먼저 방전되며, 황이 녹으면서 S<sub>2</sub> 기체가 방전을 주도하여 발광을 일으킨다. 이와 같이 전극이 없고 가시광선 영역에서의 방사 스펙트럼이 태양 광에 가까우며, 자외선이나 적외선은 매우 작다(2~3).

본 논문은 1 kW급 무전극 황 램프에서 황의 첨가량 변화에 따른 발광 스펙트럼과 상관 색온도를 측정하였다. 또한 상관 색온도 보상을 위하여 NaI 화합물 첨가에 따른 CIE 색좌표를 측정하였다.

2. 실험 및 결과

황 증기는 8개에서 2개 사이의 황 원자로 구성되어 있다. 대기압에서 황 증기는 그림 1과 같이 온도가 낮을 때 대부분 S<sub>8</sub>로 구성되어 있으며, 온도가 높아질수록 S<sub>8</sub>의 비율이 낮아진다. 온도가 900K 이상에서 대부분의 황증기는 이원자 황(S<sub>2</sub>)으로 이루어지게 된다. 특히 방전에 의해 생성된 황증기는 900K 보다 훨씬 낮은 온

S<sub>2</sub><sup>32</sup>에서 발생하는 대부분의 천이는 그림 2에서 그려진 기저상태의 X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>state와 여기상태인 B<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>state 사이에서 발생한다. X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>stats는 진동 양자수(vibrational quantum number) v'가 9에서 32까지 모두 33개의 진동 에너지 준위가 존재하고 각각의 진동 에너지 준위에 대한 많은 수의 회전 에너지준위가 존재한다. B<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup> state에는 v'가 0에서 9까지 10개의 진동에너지 준위가 있으며 각각의 준위에 대해 다수의회전 에너지준위가 존재하며, v'가 10이상 되면 B<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>와 중첩되면서 Π anti-bonding state에 의해 S 단원자로 해리된다.

또한 X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>와 B<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>는 삼중상태(triplet state)이기 때문에 각 준위마다 3개의 상태가 존재할 수 있고 황이 S<sup>32</sup>는 외에 S<sup>33</sup>, S<sup>34</sup>, S<sup>36</sup>등의 동위원소가 자연계에 존재하므로, 각각의 동위원소는 서로 다른 X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>-B<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>에너지 준위를 가지고 있다. 따라서 이원자 황에서는 다른 종류의 분자에서 찾아보기 힘든 약 280nm에서 700nm 사이의 전 가시광선 영역에서 수많은 천이가 존재한다. 방전시 여기서 발생하는 빛은 중첩되어 거의 연속적인 분광분포를 보인다 따라서 S<sub>2</sub>는 조명으로 사용하기에 적합한 분광분포를 가지고 있다.

실험에 사용한 황 램프는 그림 3과 같이 지름이 40 mmφ, 두께가 2mm인 quartz 볼에 아르곤(99.999%)과 황(99.98%) 및 NaI의 양을 조절하여 제작하였다. 우선 quartz 볼에 황을 각각 10~40 mg을 넣고 아르곤을 5 torr 넣어서 램프를 제작하고, 황의 함량에 따른 발광 특성을 측정하였다. 또한 최적의 램프에 NaI의 첨

가량을 변화시켜 quartz를 제작하였다.

초고주파 에너지를 cavity 내부에 집중시키는 공진기는 황동 mesh를 이용하여 원통형 quartz 볼 외부에 장착하였다. 전원장치는 2.45 GHz의 초고주파 에너지를 발생시키는 전자랜지용 마그네트론을 사용하였다. 실제로 cavity 내부에 전달되는 전력은 입사 전력에서 반사되는 초고주파 전력을 제거한 값을 정의하였다. 또한 반사된 초고주파는 재 입력이 되지 않도록 isolator에서 제거하였다.

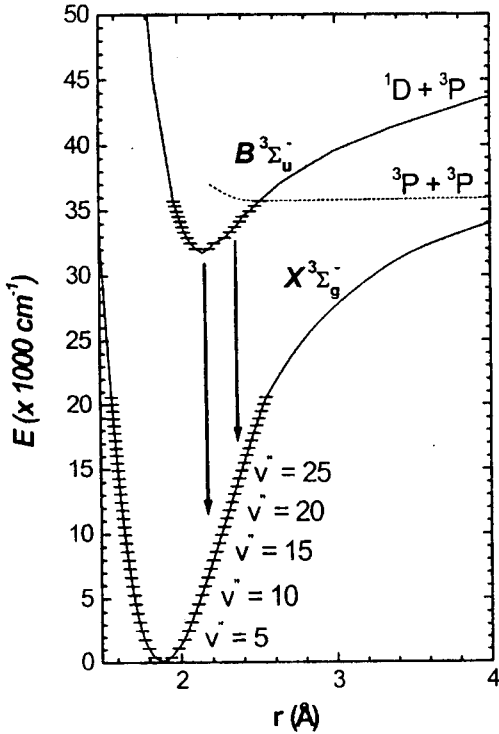


그림 2. S<sub>2</sub>의 에너지 준위

램프에서 발광된 빛은 Diode array type monochromator (PSI, Darsa -2000)로 분광하여 컴퓨터에서 발광 스펙트럼, CIE 색좌표 등을 측정하였다.

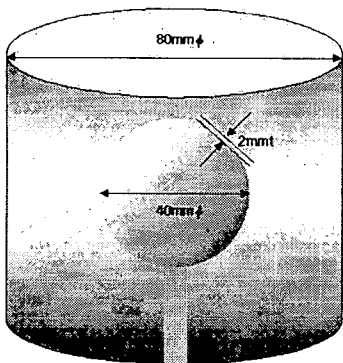


그림 3. 황 램프 및 공진기의 구조

황 램프의 아르곤을 5 torr로 고정하고, 황의 양을 10~40 mg으로 변화시켰을 때 1 kW 초고주파 에너지에

대한 발광 스펙트럼은 그림 4에 나타났다. 400 nm 이하의 자외선 부근과 750 nm 이상의 적외선 부근의 광 세기는 중심 파장에 비해 상대적으로 약했다. 하지만 황의 함량이 10 mg이상 증가함에 따라 장파장의 스펙트럼 강도가 상대적으로 증가했다. 황의 함량 증가에 따른 스펙트럼 강도 증가와 더불어 중심 발광 피크의 이동은 30~50 nm을 나타냈다. 이러한 스펙트럼 피크 이동은 방전구 안의 황 기체의 온도와 압력이 높아져 자외선 영역에서 흡수로 사료된다. 자외선의 흡수는 황의 함량이 20 mg 이상부터 감소하고, 500 nm 이하의 파장 영역의 흡수로 진행됨을 알 수 있다.

모든 광원은 자신의 광원색과 더불어 고유의 색온도를 갖게 된다. 이 경우 완전 복사체 (black body: plankian radiator)가 아닌 경우에는 광원의 색온도는 프랑크의 궤적상에서 벗어나게 되는데 이러한 경우에도 색좌표 상에서 가장 가까운 궤적상의 한 점을 택하여 색온도를 정한다(4). 이때의 색온도는 완전복사체의 경우처럼 실질 온도와는 다를 수 있으며 이와 구분하여 상관 색온도라고 부른다. 그림 5는 그림 4에서 측정된 발광 스펙트럼에 대한 CIE 색좌표 및 상관 색온도를 나타낸다.

황의 함량 증가와 더불어 상관 색온도는 감소하며, 스펙트럼이 장파장으로 이동함을 설명할 수 있었고, 광원의 회전에서 발생하는 S<sub>2</sub> 가스막이 내부 표면에 형성하여 생성되는 optical trapping 현상과 같이 상관 색온도가 훨씬 낮아지고 푸른빛이 감소되어 연색지수가 개선될 수 있다. CIE 색좌표의 궤적은 황의 함량의 증가와 더불어 백색광원의 영역에 근접함을 나타냈다.

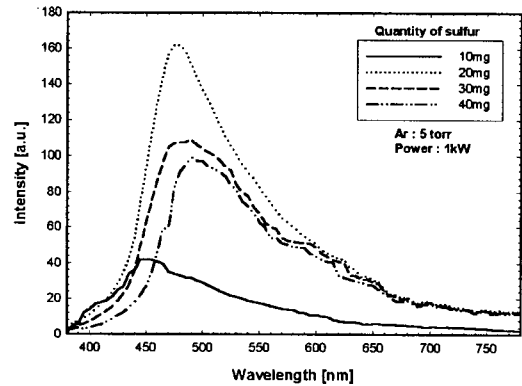


그림 4. 무전극 황 램프의 황 함량에 따른 발광 스펙트럼

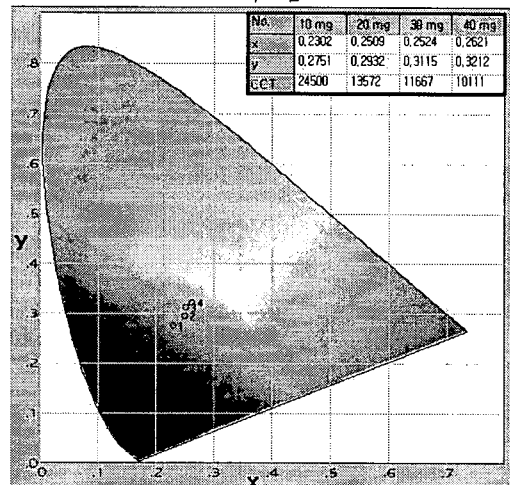


그림 5. 무전극 황 램프의 황 함량에 따른 CIE 색좌표 및 상관 색온도

그림 6은 황 20 mg 첨가한 황 램프에 NaI를 1~9 mg 추가한 램프들의 발광 스펙트럼을 나타내며, 그림 4의 황 램프의 발광 스펙트럼과 비교하여 황과 나트륨이 함께 발광에 기여함을 알 수 있다.

일반적으로 황은 UV영역에서 방사를 하지만, 고압 sodium 램프에서 재흡수에 의해 양쪽 날개 파장 방사가 흡수되는 것과 유사하게 황 램프 내부의 압력이 상당히 높으면 UV 방사는 재흡수되어 가시광선 영역에서 강제 방사된다 [5]. 특히 588 nm 부근에 강한 피크가 있는데 이는 나트륨 원자의 D line으로서 CIE 색좌표 및 상관 색온도의 개선에 기여한 것으로 사료된다. 또한 NaI의 함량이 증가함에 따라 588 nm 부근에서 나트륨의 D line에서 재흡수가 발생하여 파장 폭이 증가되었

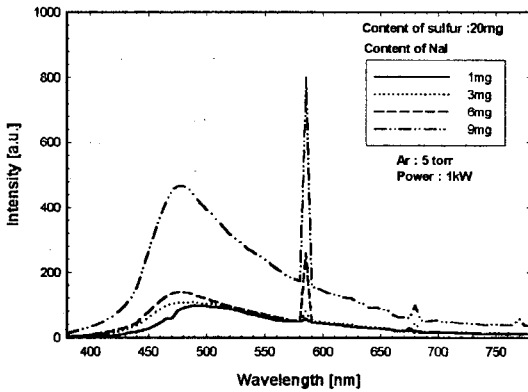


그림 6. 무전극 황 램프의 NaI 함량에 따른 발광 스펙트럼

그림 7은 NaI 함량 변화에 따른 CIE 색좌표 및 상관 색온도를 나타낸다. 황 20 mg만 넣은 램프는 CIE 색좌표가  $x=0.2509$ ,  $y=0.2932$ , 상관 색온도는 24,500K를 나타냈다. NaI 함량을 증가함에 따라 CIE 색좌표의 중앙 백색광으로 이동하는 현상이 나타났으며, 특히 황 20 mg과 NaI 9 mg을 포함한 램프는 CIE 색좌표가  $x=0.3248$ ,  $y=0.3367$ , 상관 색온도는 5,849 K를 나타냈다. 또한 NaI 첨가물의 증가는 상관 색온도를 크게 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

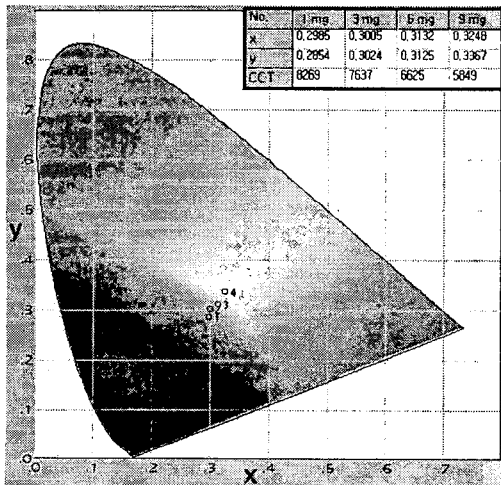


그림 7. 무전극 황 램프의 NaI 함량에 따른 CIE 색좌표 및 상관 색온도

### 3. 결 론

본 논문은 1 kW급 무전극 황 램프에서 황의 함량과 NaI 첨가량 변화에 따른 발광 스펙트럼과 상관 색온도를 측정하였다.

- 1) 황의 함량 증가와 더불어 상관 색온도는 감소하며, 스펙트럼이 장파장으로 이동함을 설명할 수 있었다.
- 2) 상관 색온도의 감소로 램프의 푸른빛이 감소되고 CIE 색좌표의 궤적은 황의 함량의 증가와 더불어 백색광원의 영역에 근접함을 나타냈다.
- 3) NaI 첨가량 증가에 따라 588 nm 부근에 강한 피크가 있는데 이는 나트륨 원자의 D line으로서 CIE 색좌표 및 상관 색온도의 개선에 기여한 것으로 사료된다.

본 연구는 IMT-2000 전통산업의 IT 접목기술개발 사업의 초고주파 방전 실험원 시스템 개발 과제 지원에 수행 되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- (1) B. Cook, "New developments and future trends in high-efficiency lighting", Engineering Science and Education Journal, Vol. 9, Issue 5, pp. 207~217, Oct. 2000
- (2) Didenko, K. Lynkhov, G.A. Shipilov, K.F. Vinogradov, "Spectral properties of low-temperature plasma of microwave discharge in sulfur vapors", IEEE International Conference on Plasma Science, pp. 136, 1996
- (3) D.O. Wharmby, "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A, Vol. 140 Issue 6, pp. 465~473, Nov. 1993
- (4) K. Rajaram, M.J. Kushner, "A Monte Carlo simulation of radiation trapping in electrodeless gas discharges having complex geometries", Pulsed Power Plasma Science, pp. 246, 2001
- (5) J. R. Coaton, A. M. Marsen, "Lamps and Lighting", 4th edition, Arnold, pp. 225~226, 1997