

무전극 고출력 방전램프의 분자 증기 특성 고찰

원동호, 김경신, 김정원, 홍성호, 김진중

A Study on Light Sources Using Molecular Vapors for Electrodeless HID Lamps

Dong Ho Won · Kyung Sin Kim · Jung Won Kim · Sung Ho Hong · Jin Joong Kim
Taewon Lighting Technology Laboratory

Abstract - 본 논문에서는 고출력 방전 광원으로 사용되는 분자 가스 혹은 분자 증기 상태의 발광원의 종류, 그들의 물리적 및 광학적 특성, 그리고 방전 특성에 관하여 일반적으로 잘 알려지지 않은 사항들을 논의한다. 특히 고출력 조명 램프를 위한 광원으로서 연색성, 광 변환 효율, 물리화학적 특성들을 연관하여 설명한다. 최근 발견된 분자 증기의 종류 및 그들의 물리적 성질들을 중점적으로 설명한다.

화학적 특성들을 연관하여 설명한다.

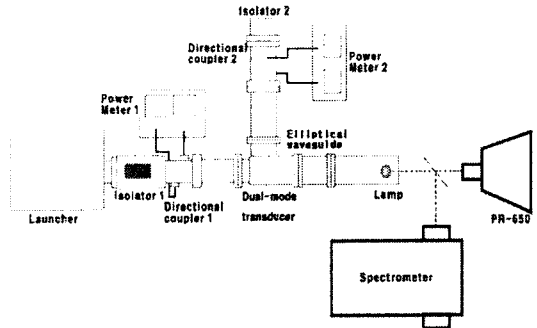
1. 서 론

2. 본 론

최근의 신 광원의 동향은 광원재료의 개선, 새로운 재료의 도입, 광원의 형상의 개선, 발광 색의 제어, 더욱이 전극을 사용하지 않는 새로운 점등방식의 램프에 관한 연구 등이 있다. 특히 새로운 점등 방식은 열방사 방전이 아닌 무전극 방전 램프로서 주목이 되고 있다. 마이크로파를 이용한 고압 방전은 welding이나 재료 처리 분야에서 연구 개발 되어 왔으나 조명용 광원을 위한 응용은 무전극 황전등이 그 효시이다. 1990년 대 초에 출현한 고압 증기를 마이크로파와 같은 초고주파로 방전하여 광대역의 집적된 가시광선을 발광시키는 기술은 조명용 광원 시스템을 위하여 획기적인 기술로 인식되어 왔다 [1,2,3,4]. 무전극 HID 램프 방전은 방전 램프 안에 전극이 없이 방전이 이루어지기 때문에 재래식 전극 램프에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 예를 들면 광원 램프 자체의 수명이 길고, 수명 기간 동안 광속유지율(lumen maintenance)이 거의 일정하고, 광 변환 효율(lumen efficacy)의 변화가 적으며, 제작이 간편하고, 무수는 및 폐기물의 최소화하여 높은 환경 친화성 등등 이다[5]. 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[6]. 앞으로 다른 발광 특성을 갖는 좋은 발광체가 더 발견될 것으로 예상된다. 그리고 조명 선진국에서 계속 연구 개발 중이며, 국내에서도 첨단기술의 확보 및 개발을 위해 노력하고 있다. 마이크로파를 이용한 고압 방전 2-원자 분자 광원은 크게 두 가지 측면에서 흥미롭다. 특정한 분자 증기의 발광 메카니즘이 그 하나이고, 또 하나는 마이크로파 고압 방전 기술 자체이다. 여기서 무전극 HID 램프 발광 시스템은 램프안에 봉입한 화합물의 종류에 따라 무전극 HID 황 램프, 무전극 HID Se 램프, 무전극 InBr 램프라고 부를 수 있다.

2.1 실험 장치

마이크로파를 이용한 무전극 방전 방식에서는 마이크로파 방전 시스템과 램프 내부에 발생된 플라즈마와의 임피던스 매칭이 중요하다. 임피던스 매칭이 되지 않으면 램프에 전달된 마이크로파는 반사되어 입사파에 영향을 주게 된다. 이러한 손실이 많아질수록 플라즈마는 작은 파워를 얻게 되어 방전 시 효율이 떨어진다.



[그림 1] experimental setup

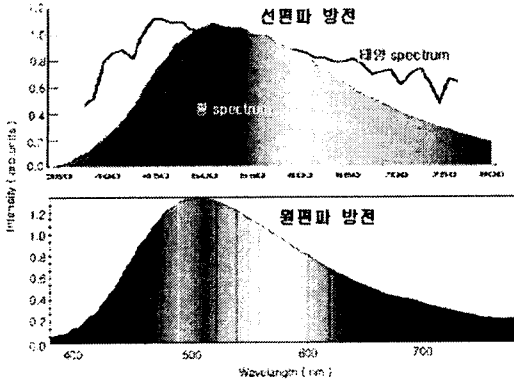
그리고 원편파를 이용한 방전 시스템의 경우 반사파에 의하여 편파가 깨질 수 있기 때문에 임피던스 매칭과 전도율의 측정은 매우 중요하다.

그림 1은 시뮬레이터(CST사의 MicroWave Studio: MWS)를 이용하여 waveguide를 설계하였으며, 실제 제작된 시스템 장치를 network analyzer (HP model 8753e)로 phase와 dB를 측정하여, 시뮬레이션과 가장 근접하게 오차를 최소화하여 제작하였다. 이 시스템은 초기 방전에 참여하지 못한 반사파는 dual-mode transducer를 사용하여 제 2 Isolator에 흡수 되도록 설계하였다. 그리고 발광 램프의 물리 광학적 특성을 측정하기 위하여 spectrum은 1/2 m spectrometer (Acton model 500i) 사용 하였으며, 연색성(Color Rendering Index:CRI)와 상관 색온도는 colorimeter (Photo Research model PR-650)를 이용하여 측정하였다.

2.2 무전극 HID 램프의 발광 특성

잘 알려진 무전극 HID 황램프의 스펙트럼은 그림 3과 같이 가시광선 전역에서 광이 나오는 broadband이며 태양광과 흡사한 스펙트럼이다.

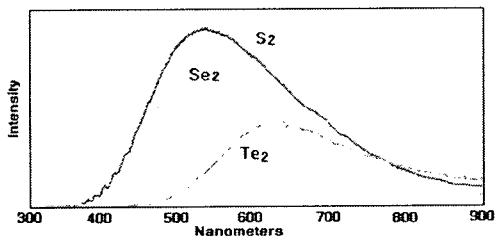
본 논문에서는 고출력 무전극 HID 램프의 발광 특성을 물리적 광학적 특성에 대하여 논의하고 특히 고출력 조명 램프를 위한 광원으로서 연색성, 광 변환 효율, 물리



[그림 2] 태양광과 마이크로파 방전에 의한 무전극 HID 황 램프의 스펙트럼

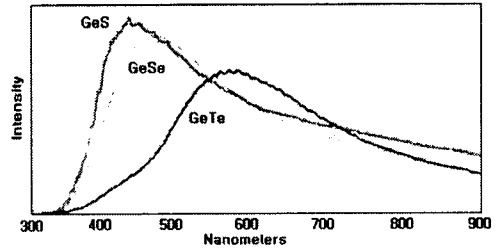
그림 2와 같이 자연광과 비슷한 스펙트럼을 가지는 Fusion Lighting에서 개발한 무전극 HID 황전등은 마이크로파 input power가 800 W일 때 광 변환 효율이 164 lm/W, 연색성은 80 Ra 가 시연되었다. 황 분자의 에너지 준위를 보면 이론적으로는 자외선이 가장 강한 전이 특성을 갖는다[7]. 실제로 무전극 황전등이 발명된 것은 황 증기를 자외선 광원으로 개발하려고 시도하는 중에 어떠한 특정한 조건이 만족되면 높은 연색성지수의 백색광 스펙트럼이 나온다는 것이 발견되었기 때문이다. 여기서 “특정한 조건”이란 황 분자의 밀도가 높아 공명 전이(resonance transition)에 해당하는 자외선 광이 바닥 상태에 있는 중성 황분자들(neutral sulfur molecules)에 의하여 모두 재 흡수 되는 소위 복사광 트랩(radiation trapping)이라는 물리 현상이 일어나도록 하는 것이다. 황 분자 증기와 마이크로파 방전의 결합은 혁신적인 램프의 가능성을 보인 한 예이다.

무전극 HID 램프 시스템은 램프 내부에 돌출된 도체 전극이 없기 때문에 기존의 전극 램프에 비해 전극에 의한 수명단축이 없고 고온의 전극과의 반응성 때문에 조명용으로 사용하지 못하던 새로운 화합물을 사용할 수 있다. 최근에는 황 분자 증기가 아닌 다른 2-원자 분자 증기의 연구 개발되고 있다. 예를 들면 녹는점이 낮은 화합물과 이온화 에너지가 작은 화합물의 조합과, 원자 스펙트럼을 고려하여 화합물을 램프에 봉입 할 수 있다. 그림 3은 마이크로파 방전에 의한 황, Selenium, Tellurium의 스펙트럼이다[8,9,10]. 황과 마찬가지로 Selenium, Tellurium도 자외선은 거의 나오지 않으며, 가시광선 전역에서 광이 나오는 broadband emission 스펙트럼이다.



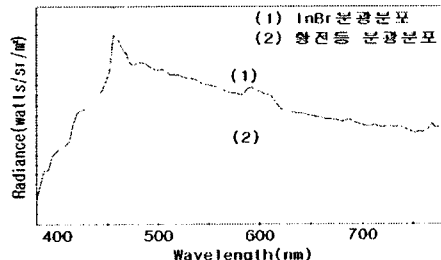
[그림 3] Typical emission spectra of Sulfur, Selenium and Tellurium microwave discharges[11]

그림 4는 마이크로파 방전에 의한 14족과 16족의 combination으로 GeS, GeSe, GeTe의 발광 스펙트럼을 측정된 결과이다. GeTe의 경우 마이크로파 input power가 1 kW일 때 광 변환 효율이 115 lm/W, 색온도는 4600 K, 연색성이 84 Ra로 측정되었다.



[그림 4] Measured spectra of Ge-chalcogenide discharges at 1000 W input power[12]

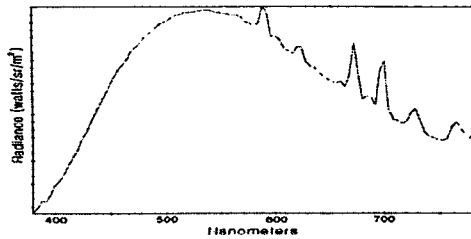
이 밖에도 InBr, CsBr, InF, 등등 메탈 할라이드 계열의 화합물도 램프안에 봉입하여 발광 시킬 수 있다. 메탈 할라이드 계열의 스펙트럼은 메탈의 원자 peak를 확인 할 수 있으며 가시광선 영역의 스펙트럼이 추가 된 broadband이다.



[그림 5] 마이크로파 방전에 의한 무전극 HID 황, InBr 램프의 발광 스펙트럼

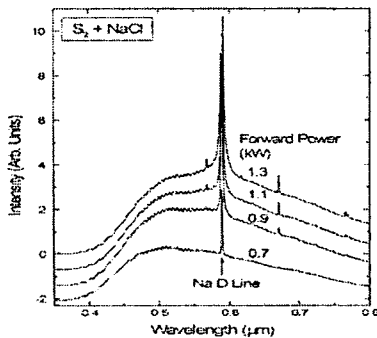
무전극 HID InBr 램프의 경우 입력전력 1 kW 인가 시 연색성이 90 Ra 이상이며, 휘도는 $2.300e + 007$ cd/m² 이상인 고휘도, 고연색성 램프이다. 그림 5는 황과 InBr의 발광 스펙트럼을 비교한 것인데, 550 ~ 780 nm 부분의 스펙트럼이 확연하게 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 연색성을 측정된 결과 InBr의 경우는 97 Ra, 황의 경우는 80 Ra로 측정되었다. InBr의 경우는 스펙트럼에서 어느 정도 예상할 수 있듯이 적외선의 파장대 광이 황보다 많이 나오기 때문에 광 변환 효율은 떨어질 것으로 예상된다. 그러나 InBr의 경우는 저출력에서도 높은 연색성을 보이는 특성을 가지고 있으므로 저출력 고휘도, 고연색성의 광원이 필요한 응용 분야에 적용 할 수 있다.

무전극 HID 램프 시스템의 또 하나의 특성은 연색성과 색온도를 조절 할 수 있다는 것이다. 무전극 HID 램프는 입력전력과 화합물의 양 조절로 연색성과 색온도를 조절 할 수 있다. 그리고 다른 화합물을 첨가하여 연색성과 색온도를 조절하면서 원하는 광을 얻을 수 있다.



[그림 6] 마이크로파 방전에 의한 무전극 HID 황+CsBr 램프의 발광 스펙트럼[13]

그림 6은 무전극 HID 황 램프에 CsBr을 첨가하여 연색성과 상관색온도를 조절한 스펙트럼이다. 상관색온도는 4700 K 에서 6100 K 이 나왔으며, 연색성은 89에서 91 까지 조절 할 수 있었다. 그러나 연색성을 좋게 하면 광 변환 효율은 떨어지는 것을 알 수 있었다.



[그림 7] 무전극 HID 황 + NaCl 램프 발광 스펙트럼

그림 7은 무전극 HID 황램프에 NaCl을 첨가한 램프의 발광 스펙트럼이다. 588 nm 부근에 강한 peak는 Na 원자의 D line으로서 방전광의 연색성 및 상관색온도 개선에 기여한다. 입력전력이 증가할하면서 588 nm 부근에서 나트륨의 D line에서 재흡수(self absorption)가 일어나며 선 폭이 증가한다[14].

3. 결 론

무전극 HID 램프는 화합물의 종류에 따라 발광하는 플라즈마의 물리 광학적 특성이 다르다. 본 논문에서는 무전극 HID 램프에 봉입할 수 있는 여러 가지 화합물 중 몇 가지의 화합물의 물리 광학적 특성에 대하여 알아보았다. 황 분자의 경우 효율이 마이크로파 input power가 800 W일 때 광 변환 효율이 164 lm/W, 연색성은 80 Ra 가 시연되었으며, GeTe의 경우 마이크로파 input power가 1 kW일 때 광 변환 효율이 115 lm/W, 색온도는 4600 K, 연색성이 84 Ra 가 시연되었다. 그리고 InBr의 높은 연색성과 광 변환 효율이 높은 황에 다른 화합물(메탈 할라이드)을 혼합하여 연색성과 상관 색온도를 조절할 수 있었다. 본 연구팀에서는 무전극 HID 램프의 원하는 상관색온도와, 연색성, 스펙트럼을 얻기 위하여 계속 연구 중에 있으며, 앞으로 다른 우수한 화합물을 발견하여, 그 화합물이 봉입된 램프와 마이크로파 방전시스템의 최적화가 이루어진다면 일반 조명에서부터 고휘도, 고연색성을 필요로 하는 정보표시 첨단 광원까지 광범위한 응용이 예상된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 산업자원부 "IMT-2000/전통산업의 IT점목기술개발사업"의 지원으로 수행 하였습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jin J. Kim, J. T. Ko, and D. H. Won: "High-intensity light sources using high-pressure molecular radiators discharged by circularly polarized microwaves", 10th Int. Symp. on Light Sources, Toulouse, France(2004)
- [2] Wharmby, D. O.: "Electrodeless lamps for lighting: a review." IEE Proceedings 140A, pp465-473, 1993.
- [3] J. J. Kim, D. H. Won, J. T. Ko, J. W. Kim, S. S. Kim, H. Y. Chang, "Rotating plasma discharges of high-pressure molecocccular vapor using circularly polarized microwaves", Appl. Phys. Lett., VOL. 84, No. 15., 12 April 2004.
- [4] Jin J. Kim, J. T. Ko, D. H. Won, S. S. Kim, and H-Y Chang, Appl. Phys. Lett. 84(2004)2769.
- [5] 김진중외 4인, "마이크로파 방전에 의한 광학적 공동안에서 고압 2-원자 황증기의 분광학적 특성연구", 한국광학회 2002년도 하계학술발표회 논문집, pp.114-115, 2002. 7.
- [6] Donald, A. M., Turner, B. P., Dolan, J. T., Kirkpatrick, D. A. and Leng, Y., 1999: "High frequency inductive lamp and power oscillator", U.S. Patent, 6,137,237
- [7] Peterson, P. A and Schlie, L. A 1980: "Stable Pure Sulfur Discharge and Associated Spectra", J. Chem. Phys., Vol. 73, pp. 1551 - 1566.
- [8] Patent US 5404076(1995)
- [9] Patent US 5661365(1997)
- [10] Patent WO_99_65052(1999)
- [11] Turner, B.P., Ury, M.G., Leng, Y. and Love, W.G., Sulfur Lamps - Progress in Their Development, J. of the Illum. Eng. Soc., Vol. 26, no. 1, pp. 10-16(1997)
- [12] J. Baier, A. Kärber, R. Scholl, R. Hilbig, Group II-II Compounds as Molecular Radiators in HID Plasmas, 10th Int. Symp. on Light Sources, Toulouse, France(2004)
- [13] 원동호외 5인, "무전극 HID 황램프 특성 연구", 대한전기학회 2004년도 초고주파 방전 신광원 시스템 전문 Session 논문집, PP. 51-53, 2004. 7
- [14] J. R. Coaton and A. M. Marsden 1997 "lamps and lighting" pp. 113-115(Arnold London)