

## 1. 서론

조명 분야는 지난 100여년 동안에 시장 규모나 성능면에서 지속적인 발전을 이루어 왔다. 특히, lighting system 분야는 약 30년의 주기로 발광원리가 크게 변화하는 기술의 break-through를 이어나가고 있다. 발광 원리의 발전을 바탕으로 백열등에서 형광등, 그리고 고압 방전등으로 발전하고 있으며 이에 따라 시장 상황도 변화하고 있다.

이러한 lamp의 주요한 기술 개발은 소비 전력 절감을 위한 에너지 효율 향상 측면과 유지보수 측면에서 효과가 있는 lamp의 장수명 기술 개발 및 소비자들이 태양광과 유사함을 느끼도록 자연광에 근접한 연속 spectrum을 방출하는 기술에 대한 연구 등이 국내외의 학자나 업계에서 지속적인 연구와 개발이 뒤따라 왔다.

그러나, 이러한 꾸준한 노력에도 아직까지 국내의 lamp 관련 기술은 다소 정체되고, 새로운 방식의 lamp는 외국에서 먼저 개발되는 현실이 국내 조명 시장의 활력을 앓아감으로써 지속적인 연구 개발에 걸림돌로 작용하고 있다.

따라서 이와 같은 현실 속에 국내의 조명 기술의 수준을 한단계 향상시킬 수 있는 새로운 lamp에 대

한 기술 및 제품의 개발이 매우 필요한 시점이다. 이에 대한 일련의 연구로써 무전극 lamp 및 자연광에 근사하며 에너지 효율이 획기적으로 향상된 특성을 갖는 새로운 방식의 lamp system인 plasma lighting system이 소개되고 있다.

Plasma lighting system은 국내외에서 약 5년 전부터 본격적인 연구가 시작되었으며 국외 일부 선진 조명업체에 의해 상품화가 진행되고 있다. 해외에서는 미국의 Fusion Lighting에서 고출력 plasma lighting system에 대한 연구 및 상품화가 진행 중이고, 국내에서는 한국전력에서 bulb 특성에 대한 기초 연구를 약 3년간 수행했으며, LG전자에서도 system 설계에 대한 연구를 수행하여 다양한 상품화를 진행 중이다. 또한, 국내의 일부 조명 회사에서도 bulb에 대한 연구가 진행 중에 있다. 특히 이 lamp system은 전극이 없는 bulb에 고주파를 입사하여 plasma를 발생시키고, 이 plasma로부터 가시 광선이 방출되는 기본 원리를 응용한 lighting system이다. 물론 이론적인 원리는 약 60년 전에 정립이 되었지만 설계 기술 및 적절한 부품 개발의 어려움으로 아직까지 상용화를 하지 못하였다. 그러나, 기술 및 부품의 지속적인 발전으로 이제는 충분한 설계 기술과 부품이 확보되어 상품화 할 수 있는 길이 열리게 되었다. 이에 plasma

lighting system의 주요 설계 기술에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. Plasma Lighting System의 발광 특성

Plasma는 오래 전부터 조명용으로 이용되어져 왔다. 형광등, 수은등, 나트륨등, 메탈 할라이드등도 plasma를 조명용으로 이용하는 것이다. Plasma를 발생시키는 방법은 크게 DC에 의한 방전, 인덕션에 의한 방전, 고주파에 의한 방전 세가지로 나눌 수 있으며, 각각의 방식에 장단점이 있다. 기존 고압방전램프의 경우 전극이 bulb내에 위치함으로써 전극과 가스의 작용과 전극 자체의 산화등에 의해 bulb의 수명이 짧아지게 되는 단점을 가지고 있으나, 최근 조명용으로 사용되는 고주파에 의한 방식은 bulb내에 전극이 삽입되지 않으면서도 방전을 할 수 있는 큰 장점을 가진다. 현재 고주파 무전극 램프에 대한 연구는 Fusion Lighting, GE, Philips, Osram등 기존의 선발 조명업체에서도 연구개발이 이루어지고 있으며 outdoor용 및 프로젝션 램프, 자동차 전조등, 의학용 그리고 가정용으로 사용 가능한 저출력쪽에서의 연구가 진행중이다[2].

본 논문에서는 plasma 방전과 광 복사 메커니즘의 물리적인 현상의 기본 원리를 다루고 이를 응용하여 방전을 효율적으로 개시하고 유지하기 위한 최적의 고주파 시스템을 구축하는 방법을 설명하고 이를 통해 전체 시스템의 효율 향상과 과도 현상 및 설계 이론을 적용 시키는 시스템의 개발을 다루고 있다.

### 2.1 고주파에 의한 방전 특성

고주파 방전의 단계는 크게 3단계로 나뉘어지며 각 단계는 독립적으로 다루어질 수 있다. 즉 고주파를 처음 입사 시에 발생하는 방전개시의 단계가 처음 단계이며, 열적 평형상태로 변환되기 이전의 비평형 방전이 두 번째 단계이고, 세 번째 단계가 광원의

로 사용되는 가시광을 복사하는 열 평형방전이다.

#### 2.1.1 고주파에 의한 방전개시

고주파 방전개시는 보통의 기체 방전개시와 같이 전자의 충돌에 의한 이온화과정이 시작되는 방전의 초기단계를 의미한다. 방전 현상을 이해하고 최적의 시스템을 설계하기 위해서는 이 단계를 충분히 이해하는 것이 필요하다. 특히 방전개시를 발생시키는 최소 고주파 파워 등의 인자 값을 파악하는 것이 중요하다.

현재 고주파 방전개시 현상에 대해서는 많은 연구가 이루어져있다. 적당한 가스 압력 조건에서 다음과 같은 전자에 의한 중성기체의 이온화 방전식을 도입할 수 있다.

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = D \Delta N_e + (\nu_i - \nu_a) N_e \quad (1)$$

여기서,  $N_e(r,t)$ 는 전자밀도,  $D$ 는 자유전자 확산계수,  $\nu_a$ 는 전자의 분자에 대한 부착 주파수,  $\nu_i(|E|)$ 는 고주파 전기장의 크기에 의존하는 전자 충돌 이온화 주파수이다.

식(1)에서 자유전자확산계수  $D$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$D [cm^2/s] = \frac{\nu_e^2}{3\nu_{en}} = \frac{\nu_e^2}{3N_g \sigma_{en} \nu_e} \approx 2.1 \times \frac{10^6 \sqrt{T_e [eV]}}{P [Torr]} \quad (2)$$

위에서  $\nu_e = 6.693 \times 10^7 (T_e)^{1/2}$ 는 열전자 속도이고  $T_e$ 는 전자의 온도이다. 이온이나 중성 기체에 의한 전자 부착 주파수  $\nu_a$ 는 압력에 비례하고 기체의 종류에 따라 다르다.

여기서  $\lambda$ 는 자유전자(유효) 확산 길이이다.  $\gamma$

= 0 라고 하면 아래와 같이 방전개시가 시작될 때의 전계를 계산할 수 있다.

$$\nu_i(E_{th}) = \frac{D}{A^2} \quad (3)$$

고압력과 저압력의 조건에서 위의 식을 적용하면 방전개시가 시작될 때의 전계의 크기를 알 수 있다. 고주파에 의한 방전개시 시 압력과 전계와의 관계는 압력이 높을 때 전계가 압력에 비례하고 압력이 낮을 때는 전계가 압력에 반비례한다. 이는 DC 방전에서의 Paschen Curve와 유사한 결과이다. 실제로 기존의 여러 실험에서 측정된 고주파 방전개시 그래프는 아래와 같다.

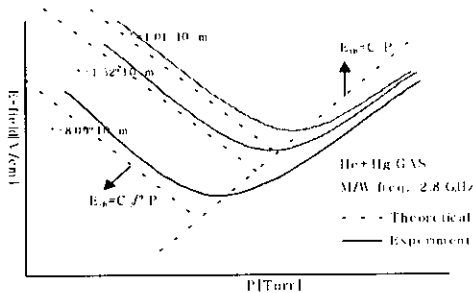


그림 1. 압력과 방전개시 전계와의 관계

또한 계산된 방전개시 전계로부터 최소의 방전개시 전계의 크기를 구할 수 있으며 그 값은 다음과 같다.

$$E_{\min} = 2\sqrt{\frac{2\nu V_i m}{e\Lambda M} \left(\frac{\pi M e T_e}{3}\right)^{1/4}} \quad (4)$$

위 식은 절연 파괴를 일으키는 최소 전계가 고주파 주파수  $\nu$ , 중성 기체의 이온화 에너지  $V_i$ , 유효 확산 거리  $\Lambda$ , 전자와 이온의 질량  $m$ ,  $M$ , 그리고 전자의 온도  $T_e$ 의 함수임을 보여준다. 즉 절연 파괴를 일으키는 전계는 램프를 채운 가스의 종류, bulb의 크기, 압력 그리고 온도에 따라 변하는 값임을 알 수 있다. 램프에 아르곤 가스만 봉입되어 있을 경우,

bulb의 크기가  $2a = 1[\text{cm}]$ 이고, 고주파의 주파수가  $f = 2.8[\text{GHz}]$ 이라고 하면 최소의 고주파 방전개시 개시 전계는 가스 압력  $P = 6[\text{Torr}]$ 에서 발생하고 그 값은 약  $E_{\min} = 200[\text{V/cm}]$ 이다. 하지만 다른 물질이 혼합되지 되면 전계 값은 증가함을 보인다.

표 1. 가스 혼합에서의 방전개시 전계

bul b	Buffer gas=150			방전 개시 전계 V/cm
	a	b	c	
A	0.5	0.5	2	600
B	1	1	1	900
C	1	1	2	320
D	1	1	3	230
E	2	1	5	650
F	3	2	5	210

## 2.2 고압 가스에서의 열 평형 방전

방전이 계속 진행되어서 전자와 이온의 온도가 모두 고온이 되었을 때 열적으로 평형상태를 이루며 이때 비로소 조명으로 사용될 수 있는 가시광의 스펙트럼이 방출된다. bulb의 크기가 진공 중의 전자기 파장의 길이보다 작다는 가정 하에 즉  $a \ll \lambda (=c/f)$ 에서 다음과 같은 파동 방정식이 성립한다. 전계의 해를 다음과 같다고 하면  $E(r, t) = E(r) \cdot \exp(i\omega t)$ 이고 구 좌표계에서 파동방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dE}{dr} + k^2 \epsilon E = 0 \quad (5)$$

여기서  $r$ 은 bulb의 중심으로부터의 거리이고,  $\epsilon = 1 - \frac{N_e}{N_c} \left(1 + \frac{\nu_e}{\omega}\right) = \epsilon' + \frac{4\pi\sigma}{i\omega}$ 는 방전 plasma의 복소 유전체 유전율이며,  $\sigma$ 는 방전에서 고주파 흡수의 원인이 되는 전기 전도율이다. plasma의 온도는 다음과 같은 비정상 상태일 때 사용되는 아래의 열 균형 방정식으로 나타내어진다.

$$c_p \frac{T}{t} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{dr^2} (r^2 K \frac{dT}{dr}) = \frac{\eta}{2} \sigma |E|^2 \quad (6)$$

여기서  $c_p$ 는 가스 압력이 일정할 때의 열용량이며,  $K$ 는 열전도율,  $\eta$ 는 흡수된 웨이브에너지가 원자나 분자의 운동에너지로 변환되는 정도를 나타내며,  $\sigma$ 는 고주파 방전 plasma의 전기 전도율이다. 식(5)와 (6)을 Runge-Kutt 방법을 사용하여 컴퓨터 모사로 해를 구한 결과 아래와 같은 그래프를 얻을 수 있었다.

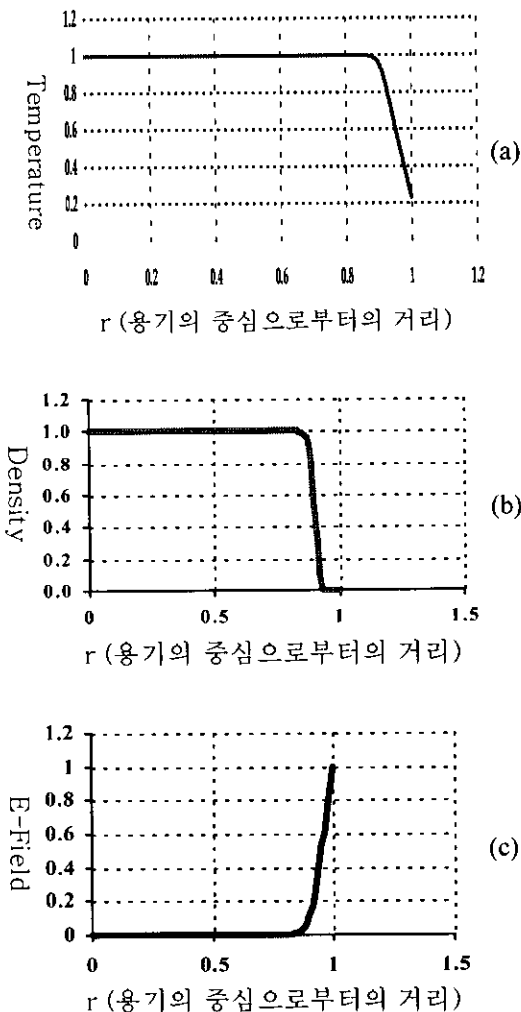


그림 2.(a)구의 반지름 방향의 온도 분포,  
(b)plasma 밀도 분포,  
(c)전계분포 [3]

그림 2에서 보여지듯이 bulb내부에 발생한 plasma의 온도와 밀도분포는 bulb내부 전반에서 거의 일정하다가 벽 부근에서 감소함을 보인다. 이는 구속된 plasma에서 일반적으로 보이는 특징이다.

또한 이 단계에서 방전을 유지하기 위해서는 방전 개시에 비해 고주파의 파워가 작아도 된다. 이는 확산계수가 D에서  $D_a$ 로 바뀌며, 또한 고온 plasma가 발생되면 전자가 충분한 에너지를 가지게 되므로 외부에서 인가되는 파워가 감소되어도 방전이 유지될 수 있기 때문이다. 그림 3에서 이를 잘 보여주고 있다.

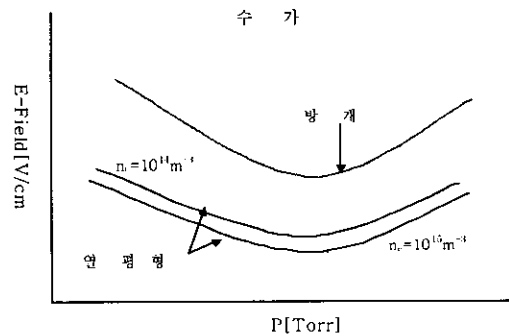


그림 3. 열적 평형상태와 방전개시 상태에서 고주파 파워와 압력의 관계 [3]

### 3. 고주파 System

Bulb를 포함하는 공진기의 임피던스는 bulb의 plasma 상태에 따라 변화한다. 즉, bulb를 점등하는 것과 점등 후 안정된 발광 상태를 유지하는 두 가지를 동시에 만족시키기가 어렵다. 고주파 시스템에서 가장 중요한 것 중 하나는 고주파 발생원과 부하 사이에서 에너지의 전달을 효율적으로 하는 것으로, plasma의 상태에 따라 bulb자체의 고주파 특성이 변하므로 각 상태에 따라 입력 임피던스가 변화된다[4]. 그러므로 도파관과 bulb를 포함한 공진기의 임피던스를 마그네트론 임피던스의 복소 공액(Complex Conjugate)과 정합시켜주는 것이 필요하게 된다. 방

전개시 후 열적 평형상태로 가기 전에 bulb가 꺼지기도 하고, 또 bulb가 열적 평형상태가 되어도 전자파의 임피던스 정합이 나빠져서 시스템 전체의 효율이 크게 저하되기도 한다.

이 특성을 개선시키도록 system을 설계하는 것이 중요하다. 만일 열적 평형 상태에서 반사파가 많이 발생되면 이로 인해 마그네트론의 동작이 불안정하게 되거나 비정상적으로 발진하게 되고, 마그네트론의 온도가 상승하여 마그네트론의 수명이 크게 단축된다.

이러한 상반된 특성을 갖는 고주파 system을 설계하여야 하는 어려움이 있다이를 위해 사각형 도파관을 갖는 고주파 시스템의 구조를 개발하였고 그림 4에 구조를 나타내었다.

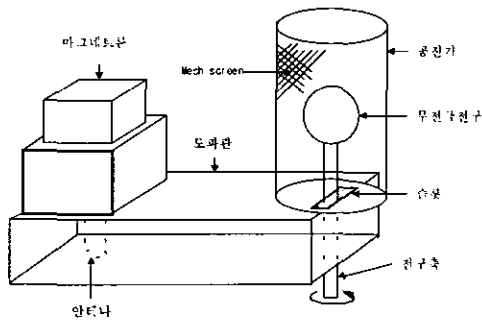


그림 4. 사각형 도파관 plasma 구조

그림 4의 직사각형 도파관은 램프의 plasma 상태에 따른 임피던스 정합을 최적화 되도록 설계되었다. 또한 램프의 plasma가 열적 평형상태 일 경우 bulb 내의 전자파 분포의 불균일로 발생하는 plasma의 국부 발생을 방지하고 bulb의 열적 파손을 방지하기 위한 냉각을 위해서 bulb축을 중심으로 bulb를 회전시켰다. 도파관은 기동시에 공진기 내에 강한 전계가 인가되도록 설계하였다. 즉, bulb의 방전개시 시, bulb가 완전히 켜지기 전에는 도파관 내에 정재파가 생기고 결합 슬롯을 통하여 공진기의 bulb 위치에서 최대 전계가 인가되도록 하는 모드를 유지시킨다. 관내 파장과 같은 길이의 도파관의 양쪽 끝을 막아서

공진기를 형성한다. 이런 구조를 통해서 bulb내 plasma의 상태에 따른 임피던스 정합을 구현하였다.

#### 4. 성분 개발

조명시스템의 성능은 여러 가지로 평가되어 질 수 있으나 이번 측정에서는 효율에 중점을 두고 측정을 수행하였다. 고효율의 성능을 얻기 위하여 bulb에 어떤 물질을 봉입할 것인지, 봉입량은 얼마로 할 것인지에 초점을 두고 실험을 진행하였다. 실험은 여러 가지 경우로 혼합된 bulb의 광 특성을 측정하는 것이며 이를 통해 최상의 광 효율을 나타내는 혼합비를 알아내는 것을 목표로 하였다. 특히 실험의 효율을 높이기 위해 실험계획법을 도입하였으며 이를 통하여 램프의 광 효율 증가를 위한 최적의 봉입물 혼합비를 결정하였다. Plasma 램프의 봉입물로 사용될 수 있는 물질은 거의 제한이 없다. 즉 bulb와 반응하지 않으면서 우수한 광 특성을 내고 유해하지 않은 모든 물질들이 봉입물로 사용될 수 있다. 적당한 봉입물을 선택하기 위해서 기존의 고압 방전 램프에서 사용되는 물질들을 조사하였다. 이를 통해 광 복사 특성에 큰 영향을 미치는 봉입물을 선택하였다. 그림 5는 광 특성 측정 장치의 개략도를 보여준다. 측정 램프를 적분구 내에 위치시키고 전원공급장치를 작동시켜서 램프를 동작시킨 후 분광기로부터 분석된 램프의 복사광 데이터를 PC에 저장시킬 수 있도록 되어있다. 모두 경우에 대해서 각각 그 분광 특성을 측정하였으며 그 결과는 그림 6에 나와있다.

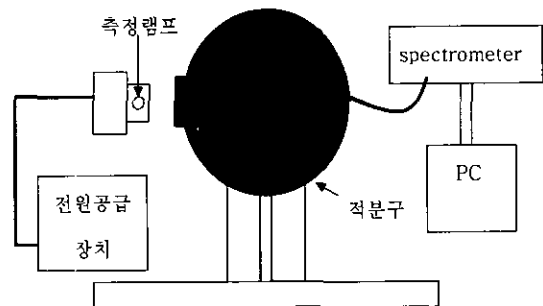


그림 5. 광 특성을 측정하는 실험 장치

분석 프로그램을 이용하여 각 봉입물이 광 효율에 미치는 영향을 구하였다. 그림 6에서 가로축은 빛의 파장을 나타내며 세로축은 복사파워를 나타낸다.

서론에서 언급했듯이 plasma 조명의 광 복사는 기존의 조명들과 비교해 볼 때, 태양광과 비슷한 우수한 흑체복사의 연속 스펙트럼을 보이며, 또한 적외선(파장이 700[nm]보다 큰 영역)과 자외선(파장이 400[nm] 보다 작은 영역)이 전체 복사파워에서 차지하는 비중이 작으므로 가시광(파장이 400[nm]에서 700[nm]까지의 영역)의 복사특성이 우수한 조명이 된다.

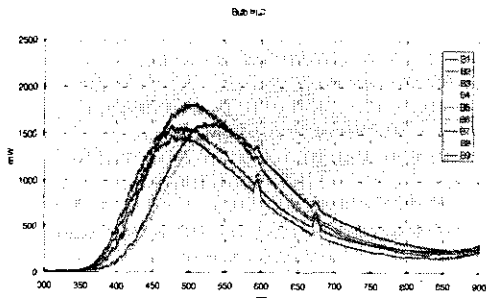


그림 6. 광 복사 스펙트럼 곡선

측정된 데이터로부터 색좌표, 색온도, 광속 을 계산하였으며, 표 3에 결과가 나와있다.

표 3. 광 복사 특성값

Bulb	B1	B2	B3
색좌표, x	0.2844	0.3009	0.3449
색좌표, y	0.3366	0.3687	0.4202
색온도	8027	6772	5170
광속	78752	104202	113092

### 5. 인버터를 사용한 광 효율 증대

Plasma 방전단계에서 지속적인 고주파 파워가

bulb에 전달되지 않을 경우 방전개시 후 열 평형상태로 진행되지 않는다. 철 공진 트랜스를 사용할 경우 펄스 파워가 발생되며 펄스 duration time이 수 ms 정도가 된다. 따라서 펄스 duration time을 작게 함으로써 방전을 용이하게 유지할 수 있으며 이로 인해 광효율을 향상시킬 수 있다.

인버터를 사용할 경우 마그네트론에서 발생하는 고주파의 펄스 duration time을 철 공진기에 비해 줄일 수 있으며 광효율을 향상시킬 수 있다. 그림 7에 인버터를 사용할 경우 펄스의 전압, 전류 파형이 나와있다.

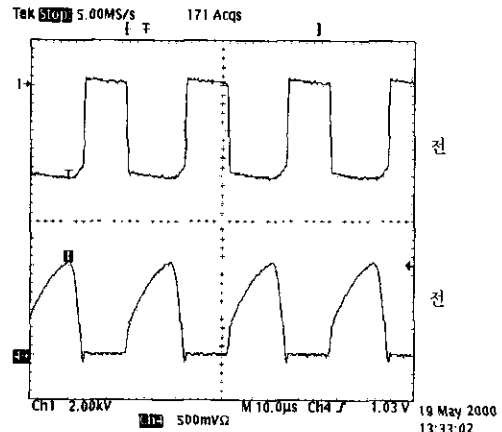


그림 7. 인버터들의 전압, 전류 파형

### 6. System Integration

고주파 시스템 개선, 봉입 성분의 최적화, 인버터의 사용을 통해서 광 효율을 향상시킬 수 있었다. 그림 8은 태양광, 메탈 할라이드 램프, 형광등, plasma 램프의 광 스펙트럼을 보여준다. Plasma 램프의 경우 메탈 할라이드 램프나 형광등에 비해 태양광과 유사한 연속 스펙트럼을 보이며, 태양광에 비해서 적외선과 자외선이 적게 방출되므로 우수한 조명원이 될 수 있다. 그림 9은 plasma lighting system이 실제로 설치된 예를 보여준다.

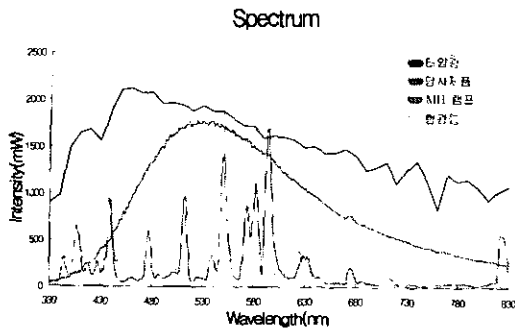


그림 8. 태양광, MH 램프, 형광등, plasma 램프의 스펙트럼 분포

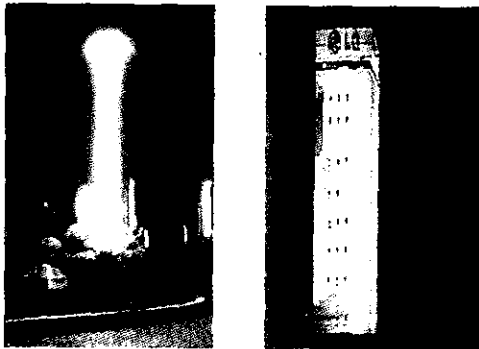


그림 9. plasma 조명의 설치 광경

## 7. 결론

고주파에 의한 plasma 방전 과정은 방전개시, 비평형 과정, 열적 평형 과정이다. 방전개시 단계는 방전의 초기의 단계로서 방전이 개시되기 위해서 높은 파위가 요구된다. 비평형 방전은 transition 단계로서 plasma가 불안정한 상태이다. 열 평형 방전단계는 안정되게 가시광을 방출하는 단계로 세 단계 모두 압력과 파위의 관계는 DC의 Paschen Curve로 표현된다.

본 논문에서는 plasma 성분과 고주파 측정파워 조절을 통해 최대의 광 효율을 갖는 시스템의 설계를 할 수 있는 방법을 도출하였다. 또한, plasma 성분에 관한 최적의 조건을 구현하였으며, 마그네트론을 동

작시키는 회로구성에서도 인버터를 사용하여 시스템의 광효율을 향상시켰다.

향후에는 plasma 방전의 주요 인자들인 전자 온도, 파워 크기, 가스 압력에 대한 측정이 필요하며, 고출력(kW급) plasma lighting system의 컴팩트화가 필요하다.

## 참고 문헌

- (1) Menno van Dongen, et al., Field Strengths and Dissipated Power in Microwave-excited High-Pressure Sulphur Discharges, J. Phys. D: Appl. Phys. 31, 1998.
- (2) Kent Kipling, et al., High Brightness Electroless Lamp for Projection Display, 1999 SID.
- (3) J Reece Roth, Industrial plasma Engineering, Volume 1(Institute of Physics Publishing), 1995.
- (4) Carlos M. Ferreira and Michel Moisan, Microwave Discharges(Plenum Press), 1992.

## ◇ 著 者 紹 介 ◇



최 준 식 (崔峻植)

1961년 8월 26일. 고려대학교, LG전자(1984년~현재, 현직 LG전자 DA, Lab 책임연구원.