

# 無電極 放電의 원리와 放電燈에의 응용

呂 寅 善

〈全南大工大 電氣工學科 教授〉

## 1. 머릿말

최근 전자회로를 채택하여 점등회로의 절전화 및 소형·경량화가 급속히 이루어지고 있는 가운데, 방전등 측면에서의 연구도 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서 대표적인 것을 들라면 단연 콤팩트 램프를 손꼽지 않을 수 없을 것이다. 그러나 콤팩트 형광등 또는 전구식 형광등이 기존의 백열전구를 빠른 속도로 대체해 가고 있으나, 수명 및 효율 등의 측면에서 아직도 개선의 여지가 많으므로 그것의 성능을 개선해 나아감과 동시에 또다른 광원의 가능성을 찾는 데에 힘을 쏟아야 할 것이다. 물론, 미국, 일본을 비롯한 여러나라에서 활발히 진행되고 있는 신평원 또는 차세대 광원 분야의 논의도 활발히 이루어져야 할 것으로 생각된다. 그러나, 연구인력과 기반시설이 취약한 국내의 경우에는 기존의 방법을 개선해 나아가는 방식이 적합할 것이다. 이러한 관점에서 보면, 방전등에 있어서 기존의 방전을 이용하는 방법 중 유망한 분야로는<sup>1)</sup>

- RF방전 및 마이크로파 방전을 이용한 무전극 램프의 개발
- 자계인가에 의한 효율향상
- 펄스방전에 의한 발광색 제어, 그리고

○ 방전의 제어와 조광 등의 분야를 들 수 있다.

특히, 방전등의 전극은 에너지 손실원이며 제조하기가 까다롭고 점등 실패의 결정적인 원인이 되는 등 전극으로 인해 여러가지 문제가 발생한다. 따라서 무전극 방전을 이용할 경우에는 이러한 점이 해소되므로, 수명의 측면에서 보면 이것만큼 확실한 해결책은 없다. 다만 일반 조명용 광원으로 사용하기에는 아직까지 효율이 낮고, 경제성이 떨어지는 점이 무전극 방전등의 실용화를 막고 있는 실정이므로, 보다 깊은 연구를 통해 실용화의 가능성 여부와 그 방법들을 밝혀야 할 것이다.

본문에서는 우선 무전극 방전의 원리와 특성을 고찰함으로써 무전극 방전의 유용성에 초점을 두고자 하며, 다음 편에서는 현재까지 개발된 무전극 방전등의 특성과 그 실용화 방안에 목표를 두고 고찰하기로 한다.

## 2. 무전극 방전의 원리

### 2.1. RF방전의 방전기구 및 특성<sup>2)</sup>

기체방전관에 교류전압을 인가한 경우, 기체의 압력 및 종류에 따라 크게 다르지만 일반적으로 수십 kHz 이하의 주파수에서는 방전기구

가 근본적으로 직류방전의 그것과 같다고 볼 수 있다. 이 때 전극이 방전관 내부에 존재하는 경우에는 이온이 음극에 충돌하여 일어나는 2차전자 방출의 효과가 지배적이다. 즉, 방전관 중의 기체가 이온화됨에 따라 전자와 함께 생성된 이온이 전계에 의해 가속되고 음극과 충돌하여 음극으로부터 2차전자를 방출시킨다. 이것을 감마효과( $\gamma$ -effect)라고 부르는데, 이와 같은 음극에서의 이온충돌에 의한 2차전자의 생성은 DC 글로우 방전을 안정하게 유지하는데 필수적인 요소이다. 아크방전의 경우에는 전극을 가열하여 열전자를 방출시킴으로써 방전을 유지하는 데 필요한 전자를 공급하고 있다. 따라서 DC 방전의 경우, 전극이 방전관의 내부에 위치하여 이온과 전극과의 직접적인 충돌이 가능하도록 하거나 열전자를 충분히 방출할 수 있어야 한다.

그러나 주파수가 증가하면 방전관 중에 남아 있는 이온이 전계의 변화를 따라가지 못하므로 방전개시 전압이 상승하고, 경우에 따라서는 직류방전의 경우의 수배에 달하기도 한다. 그러나 MHz 이상의 보다 높은 주파수 영역에서는 교류전계에 의한 전자의 왕복운동이 충돌전리를 빈번하게 일으켜 용이하게 방전을 유지할 수 있게 된다. 이 경우 방전개시 전압은 낮아지고 또한 전극이 필요없는 무전극 방전이 가능해진다.

이러한 고주파 방전의 특징은 비교적 고압방전( $\sim 10^4$  Pa)에서도 안정하고 동시에 공간적으로 균일한 플라즈마를 얻을 수 있으며, 특히 전극재료 등의 불순물의 혼입을 막을 수 있는 장점을 갖는다. 다만, 전원과 플라즈마 사이의 결합이 전기 아크에 비해 비효율적인 단점이 있다.

고주파방전(여기서는 RF방전을 의미함)은 방전을 유지하기 위해 전원과 용량적 또는 유도적으로 결합되며, 각각 용량적 결합 방전(capacitively coupled discharge)과 유도적 결합 방전(inductively coupled discharge)이라 일컫

는다.<sup>3), 4)</sup> 각각을 그림1에 나타낸다.

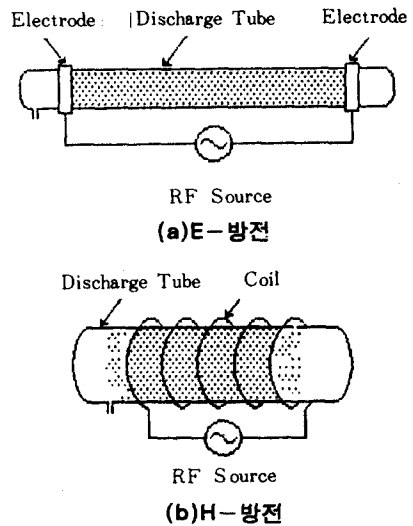


그림 1. RF방전의 예  
Fig. 1. Examples of RF discharges

(1) 용량적 결합 방전

주파수가 수십 kHz에서 수십 MHz사이인 RF전원을 평행판 전극 사이에 가할 때 전극사이에서 형성되는 전장에 의해 기체가 이온화되고 방전이 유지되는 경우이며, 이러한 이유로 E-방전이라고도 한다.(그림 1(a)) 이 방법은 변위전류(displacement current)에 의해 가열이 되므로 후술하는 유도적 결합 방전에 비해 사용주파수가 높아야 한다. 이 방전은 저밀도의 글로우방전에 해당하며 방전 중의 플라즈마는 기능성 박막이나 반도체 표면의 미세 패턴을 만드는데 사용되고 있다.

(2) 유도적 결합 방전

반응로 주위에 감겨진 코일에 고주파를 가하면 코일에 흐르는 전류에 의해 축방향의 교번자계가 형성되고 이것에 의해 플라즈마 중에 환형의 전류가 유도되어 에너지가 공급되는 방식으로서 H-방전이라고도 한다.(그림 1(b)) 이 H-방전에 의해 발생하는 플라즈마는 E-방전이 글로우에 가까운 것에 반해, 보다 고밀도의 아

크와 비슷한 성질을 가지며 유도 아크(induction arc) 또는 무전극 아크라고 부르기도 한다. H-방전의 최대 장점은 플라즈마와 직접 접촉하는 전극이 없으므로 전극재료로부터의 오염이 없을 뿐 아니라 사용가스에 따라 산화, 환원 및 부식성의 분위기를 자유롭게 만들어 줄 수 있다는 데 있다. 이와 같은 이유로서 플라즈마 화학을 이용한 고순도의 물질의 합성 및 처리에 요구되는 청정 플라즈마의 발생에 적합하며, 고온의 화학반응을 통한 신물질, 신소재의 합성 등에 효과적으로 이용될 수 있다.

## 2.2. 마이크로파 방전의 방전기구 및 특성<sup>5),6)</sup>

일반적인 마이크로파 방전의 조건( $E=200\text{Volts/cm}$ ,  $f=2.5\text{GHz}$ )하에서, 전자가 고주파 전장 속에서 중성원자와의 충돌없이 조화운동을 한다고만 가정하여 계산한 전자의 평균운동에너지는 중성원자를 이온화하기에는 아주 작은 값에 불과하다. 그 때문에 방전을 지속함에 있어서 필수적인 중성원자의 이온화가 다른 방전기구에 의해 일어나리라는 점을 알 수 있다. 즉, 전자가 중성원자와 충돌할 때 잃어버리는 에너지는 아주 작은 반면, 이 충돌에 의해 전자의 조화운동과 마이크로파 전장사이의 위상관계가 깨어져 전자가 전장의 방향이 바뀌는 다음 반주기 동안에도 계속 에너지를 흡수할 수 있도록 한다면 일부의 전자는 중성원자를 이온화하기에 충분한 에너지를 확보할 수 있으리라 생각된다. 따라서 그림 2에서 보는바와 같이 어느 정도까지 기체의 압력이 증가하는 동안에는 위에서 서술한 충돌빈도가 높아져 에너지 흡수가 효과적으로 늘어난다. 그러나 압력이 더욱 증가하면 에너지 흡수는 늘어나지만, 탄성충돌에 의한 에너지 손실의 증가와 함께 전자와 이온의 확산에 의한 소멸이 더욱 가속되어 오히려 더 큰 절연파괴강도를 필요로 한다.

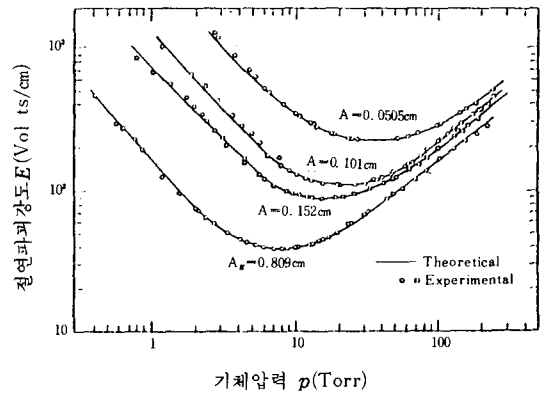


그림 2. 기체 압력에 대한 절연파괴강도의 변화  
 Fig. 2. Variations of breakdown electric fields upon the gas pressure for Heg gas, a mixture of He and Hg, at 2.8GHz (Ref[5], p.87)

한편, 마이크로 방전에서 중요한 변수 중의 하나는 외부인가 자기장의 유무로서, 방전관에 일정한 자기장을 걸어주면 하전입자의 싸이클로트론 운동에 의해 방전의 구조가 달라지게 된다. 이와같은 점을 이용하면 외부에서 적절한 크기의 자계를 인가함으로써 마이크로파의 흡수율을 상승시킬 수가 있으며, 특히 인가주파수가 전자싸이클로트론 주파수 부근에 도달하면 흥미로운 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 즉, 전자의 싸이클로트론 진동수와 마이크로파의 진동수가 같아지면 전자가 마이크로파로부터 계속 에너지를 흡수할 수 있는 공진 현상이 일어나 중성원자를 이온화시키기 위해 충분한 에너지를 얻게 된다. 이 때 사용되는 장치를 ECR(electron cyclotron resonance)장치라고 하며 고밀도 플라즈마 소스로서 최근 관심을 끌고 있다.

마이크로파 방전의 경우에는 그림 3에서 보는 바와 같이(a, 도파관 중에 방전관을 삽입하는 방식과(b) 도파관 자신을 방전관으로서 사용하는 방식)이 있다. 사용 주파수는 GHz영역의 무전극 방전에 해당하며 따라서 깨끗한 고출력의 방전을 얻을 수 있다.

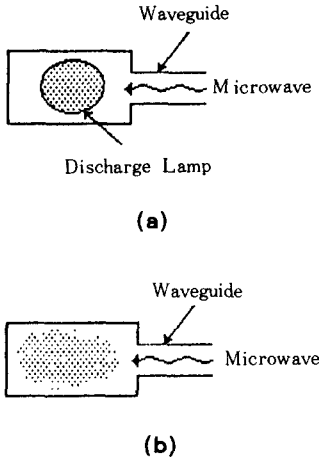


그림 3. 마이크로파 방전의 예  
Fig. 3. Examples of microwave discharges

### 3. 무전극 방전등의 예

#### 3.1. RF무전극 방전등

무전극 방전등은 분광학 등 특수한 분야에 이미 이용되고 있으나, 일반 조명용 광원으로 개발하기 위해 많은 노력이 이루어져 왔다. 미국에서는 1970년대 중반에 일반 가정용 전구를 대신할 수 있는 무전극 방전등이 등장하여 관심을 불러 일으킨 바 있다.

일명 Hollister 램프라고 불리는 이것은 저압 수은 방전에 기초한 것으로서 그림 4에서 보는 바와 같이 고주파 발생장치와 고주파 코일을 유리구 내의 캡속에 장착하는 구조로 되어 있으며, 고주파 전력에 의해 환형의 방전을 발생시키고 이로부터 방사되는 자외선을 유리구 안쪽에 도포된 형광체에 의해 가시광으로 변환하도록 되어 있다.<sup>7)</sup> 그러나 당시의 기술로서는 값싸고 콤팩트한 고주파전력을 얻기 어려웠을 뿐 아니라 필요한 정도의 강한 방전과 자외선 방사에 견딜 수 있는 형광체가 없었다는 점 등 실용화에 결정적인 제약이 되어 왔다.

이미 서두에서 언급한 바 있지만 무전극 방전을 조명용 광원에 이용하는 것은 아직 여러

가지 문제점들이 있고, 실용화가 조만간 가능할 것인지도 불투명한 상태이다. 그렇지만 무전극 방전이 갖는 장점-특히 수명이 길고 광출력 저하가 적은 점 등-이 특별히 요구되는 장소에서는 조만간 무전극 방전등이 사용될 가능성이 높다. 특히 실내에 비해 등기구의 유지 및 보수가 어려운 실외에서는 무전극 방전등과 같이 수명이 긴 광원이 적합하다.

그러면 현재까지 개발된 무전극 방전등 중 앞으로 실용화될 가능성이 있는 대표적인 예를 들어 그 구조 및 특성들을 검토하고 위에서 언급하지 않은 여러가지 장점들을 살펴보기로 하겠다.

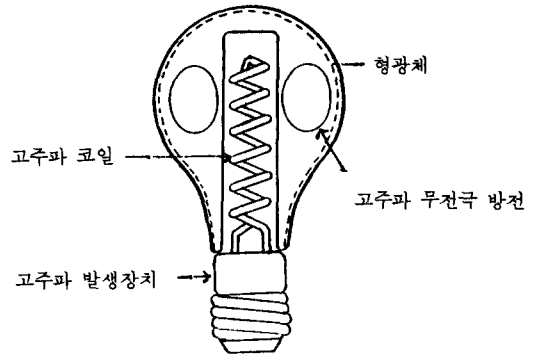


그림 4. 홀리스터 램프  
Fig. 4. the Hollister lamp

#### 3.1 RF 무전극 방전등<sup>8)</sup>

RF전력을 이용하여 무전극 방전을 실시할 경우 E-방전은 H-방전에 비해 비효율적이며 고전계에 의해 램프의 내부가 수비게 흑화되는 경향이 있다. H-방전에 있어서 코일을 유리구 안쪽에 설치하는 경우 철심 또는 공심의 선택이 있을 수 있다. 철심코일은 공심코일에 비해 큰 자계를 발생시킬 수 있고 사용주파수도 낮아지나, 철심의 열저항 문제가 발생한다. 이에 따라 코일을 유리구 바깥쪽에 설치하는 방법이 연구되고 있다. 이것의 한 예로서 다음에 소개

하는 무전극 방전등은 최근 일본의 松下電工 (Matsushita Electric Works)에서 개발된 것으로 일부 잡지에서 실용적인 무전극 방전등이라고 소개된 바 있다.

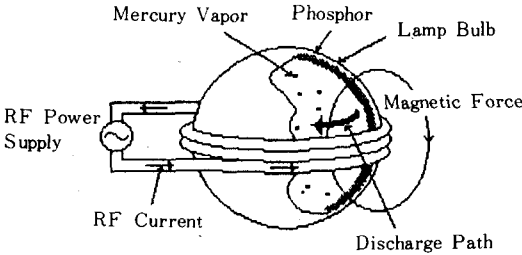


그림 5. RF 무전극 방전등의 개념도  
 Fig. 5. Conceptual sketch of the RF electrodeless lamp (Ref.[8], p.45)

그림 5의 개념도에서 보는 바와 같이 안쪽에 형광물질이 도포되어 있는 유리구를 공심 코일이 수회 감싸고 있으며, 이 코일에 RF전력을 공급하여 자계를 형성시키고 H-방전을 일으킨다. 형광체에는 높은 관벽부하와 고온에 견딜 수 있는 희토류 형광체를 사용하며, 형광체와 유리구 사이를 금속 산화물로 코팅하여 전계, 자외선 방사, 열 등에 의한 유리구의 흑화를 방지하도록 되어 있다. 또한 아말감을 사용하여 주위 온도의 변화에 따른 램프의 특성을 안정시킴으로써 특히 실외의 등기구용 광원으로 사용하도록 설계되어 있다.

RF전력을 공급하기 위한 전자회로는 그림 6에 나타낸 바와 같이 전원회로, 발진회로, 증폭회로 및 정합회로 등으로 구성되어 있고, 이것의 출력을 램프 위에 감겨 있는 유도코일에 가하고 있다. 또한, 고주파 회로에서 필수적인 EMI잡음 대책으로는 RF회로부를 금속도체로 둘러싸는 한편 램프 전면을 금속도체 망으로 하여 EMI잡음을 기본파에서 40dB, 고주파에서 15~20dB정도 감소시키고 있다. 표 1에 램프

와 주요 사양을, 그림 7에 이것의 단면도를 나타낸다.

이 램프의 주요 특징을 정리해 보면 다음과 같다.

- 보조장치없이 시동가능하다.
- 시동 및 재시동 특성이 우수하다.
- 100%~5%의 연속조광이 가능하다.
- EMI잡음이 대폭 절감된다.
- 장수명이 예상되는 점 등이다.

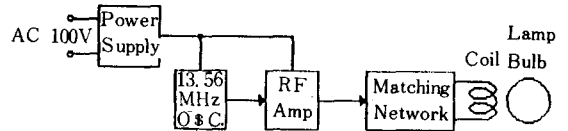


그림 6. RF 무전극 방전등 회로의 블록선도  
 Fig. 6. Circuit block diagram of the RF electrodeless lamp (Ret.[8], p.46)

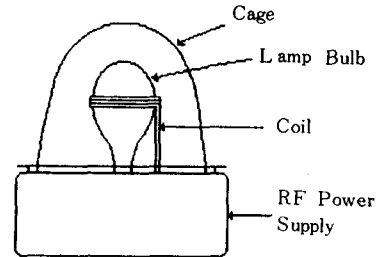


그림 7. RF 무전극 방전등 유닛의 측면도  
 Fig. 7. Side view of the RF electrodeless lamp unit (Ref.[8], p.47)

지금까지 설명한 RF 무전극 방전등은 일반 조명용 광원으로 사용될 수 있는 가능성을 충분히 갖고 있으며 앞으로도 고속 스위칭 반도체 소자 및 관련 부품의 저가화에 힘입어 그 가격 경쟁력이 크게 향상될 것으로 예상된다. 다만, 발광효율이 40 lm/W 정도로서 일반 형광등의 80~100 lm/W에 비해 상당히 낮은 값

이므로, 특히 회로효율의 개선 등에 많은 연구가 있어야 할 것이다.

표 1. 예로 든 RF 무전극 방전등의 사양  
Table 1. Specifications for the RF Electrodeless Lamp

항 목	사 양
공급전압	AC 100V/50, 60Hz
발진주파수	13.56MHz
입력전력	25W
광출력	1,000 lm
발광효율	40 lm/W
광색	백색
주위온도 허용범위	-30~45°C
크기	130mm(직경)×180mm(높이)
유리구 직경	45mm
유도코일	직경 1.8mm/권선수 3회

3.2 마이크로파 무전극 방전등<sup>9), 10)</sup>

이것은 마이크로파에 의한 방전파괴를 통해 램프 봉입물을 여기시켜 발광하는 것을 이용한 것이다. 전극을 갖는 방전등이 전극의 증발 및 비산에 의해 램프관벽의 흑화가 주원인이 되어 광출력이 열화되는 것에 반해, 램프관벽 재료

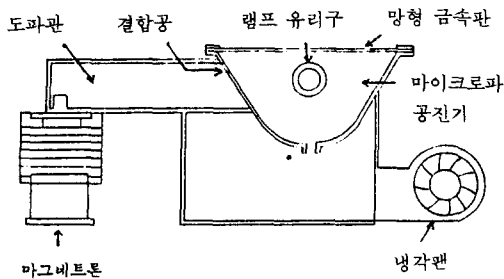


그림 8. 마이크로파 무전극 방전등의 단면도  
Fig. 8. Cross-sectional view of the microwave electrodeless lamp - TM<sub>11</sub> mode (Ref. [9], p.290)

인 석영유리의 일부가 결정화에 의해 탁해지는 정도에 그치므로 열화 정도가 아주 적은 장점이 있다. 현재까지 개발된 것 중 대표적인 것

으로는 일본의 三菱電氣(Mitsubishi Denki KK)에서 사진제판용 UV광원으로 제작한 것으로 이것의 기본 구조를 그림 8에 보인다.

이 무전극 방전등에서는 전자 레인지에 쓰이고 있는 마그네트론을 사용하여 발진주파수 2450MHz의 마이크로파를 발생시키고, 이것을 矩形의 도파관을 통해 空洞의 공진기에 전파시킨다. 공진기는 半球共振器를 변형한 것으로 광반사경을 겸하고 있으며 상부의 개구율이 90%인 網形 금속판으로 구성되어 있고, 그 내부에 球形의 무전극 램프가 설치되어 있다. 이 램프는 석영유리로 만들어져 있으며, 그 속에는 수은 및 회소가스와 함께, 방전에 의해 여기·발광하는 금속이 할로젠 화합물의 형태로 봉입되어 있다. 마이크로파가 무전극 램프에 방사되면 램프 중의 회소가스가 먼저 방전을 일으키고 관벽을 가열하기 시작한다. 온도가 상승하면 수은 및 할로젠 화합물이 증발하여 방전은 회소가스 중심의 방전으로부터 수은을 주체로 하는 금속증기의 방전으로 이행하고 봉입금속에 대응하는 스펙트럼이 발광한다. 이 때 방사되는 광은 공진기의 반사경에 의해 망형 금속판을 통과하여 외부로 방사되지만, 마이크로파는 최대한 차단시켜 금속판으로부터 20cm 정도 떨어진 곳에서의 누설 마이크로파의 세기가 1mW/cm<sup>2</sup>보다 작도록 하여 인체에 해가 미치지 않도록 하고 있다. 표 2에 이 방전등의 주요 사양을 나타낸다.

이 마이크로파 무전극 방전등의 특징을 정리하면

- 광출력 입상시간이 빠르다.
  - 램프의 재점등시간이 짧다.
  - 램프의 수명이 길다.
  - 램프관벽의 흑화에 의한 광출력저하가 적다.
  - 전극열화에 의한 점등 불량률이 없다.
  - 램프 봉입물의 선택이 자유롭다.
  - 램프로부터의 열선 방사량이 적다.
- 이와 같은 마이크로파 무전극 방전등은 현재

고출력에 있어서 상품화가 이루어지고 있으며 특히 필름인쇄와 같은 사진제판용 UV광원으로 이용되고 있고, 앞으로는 무대조명과 같은 특수 조명용 광원으로 그 이용이 기대된다.

**표 2. 예로 든 마이크로파 무전극 방전등의 사양**  
**Table1. Specifications for the Microwave Electrodeless Lamp**

항 목	사 양
입력전력	1300W(마이크로파750W에 해당)
발진주파수	2450MHz
중심파장	355~425nm
방사속	200W(금속 첨가물 Fe의 경우)
램프내경	30nm
램프증량	28W/cm <sup>2</sup>
램프전력밀도	아르곤 8kPa(~60torr)
봉입물	수은 100mg 수은할로젠 화합물, 기타 금속 첨가물

#### 4. 맺는 말

지금까지 무전극 방전의 원리와 그 유용성을 살펴보고, RF 및 마이크로파를 이용한 대표적인 무전극 방전등의 예를 들어 검토하였다. 무전극 방전에 의하면 수명이 길어지고 광출력 감소가 개선될 뿐 아니라, 보다 콤팩트한 광원으로 될 수 있으며 순시점등이 가능해지고 조광이 용이해지는 등의 특성을 기대할 수 있다. 특히 전자파 잡음대책 및 회로의 효율 그리고 가격 등에 대한 꾸준한 연구를 통해 머지않아

일반 조명용 광원으로 널리 쓰일 것을 기대하면서 앞으로 그 구체적인 실용 방안에 대한 검토가 이루어지도록 하겠다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 浦山隆, "光源システム技術の展望", 特集「21世紀の照明お展望する」, 日本照明學會誌, 第75卷 第11號, p.634, 1991.
- 2) 佐藤地, "プラズマ發生法・形態", 日本電氣學會誌, 第107卷 第11號, p.1103, 1987.
- 3) J.Szekey and D.Apelian, ed., "Plasma Processing and Synthesis of Materials", Material Research Society Symposia Proceedings Vol.30, North-Holland(1984), pp.25-27.
- 4) 황기웅 외, 대한전기학회지 제37권 제7호, "초고온 기술", p.29, 1988.
- 5) A.D.MacDonald, Microwave Breakdown in Gases, John Wiley & Sons, Inc., New York(1966). p.63.
- 6) 조영석, "고주파 전원을 이용한 개스의 글로우 방전", 한국응용물리학회지, 제2권 제3호, p.331, 1989.
- 7) C. Beardsley, "And now, the Hollister lamp", Lighting Design & Application, Vol.6, No.4, pp.48-49, 1976.
- 8) M.Shinomiya, et al, "Development of the electrodeless fluorescent lamp", J. of IES. vol.20, No. 1, 1991. pp.44-49.
- 9) K. Yoshizawa, "New light source using microwave discharge", J. of IES, Oct. 1984. pp.283-297.
- 10) 日本照明學會, 電子點燈回路に適合する光源の動向とその課題, 研究調査報告書 JIER-015(1989), pp. 22-23