

플라즈마 가시광 구동을 위한 초고주파 전계 집속형 도파관 시스템에 관한 연구

A Study on the Microwave Electric-Field Focusing Waveguide Systems for Driving Plasma Visible Light

전 후 동 · 박 의 준

Hoo Dong Jeon · Eui Joon Park

요 약

본 연구에서는 초고주파를 사용하여 플라즈마 가시광을 발생시키기 위한 전계 집속형 도파관 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 초고주파 전력 공급기인 마그네트론, 전력 전송을 위한 도파관부 및 메쉬형 공동으로 이루어진 반응기로 구성된다. 소량의 황 분말과 버퍼 가스인 Ar이 봉입된 석영 벌브를 반응기 내에 위치시키고, 강한 전계를 집속시킴으로써 황 플라즈마가 생성 및 여기되도록 하였다. 즉, 도파관과 반응기의 내벽에 각각 도체 팁을 장착시키고, 그 사이에 플라즈마 벌브를 위치시킴으로써 벌브에 강한 전계가 집중되도록 하였다. 또한 플라즈마 생성 과도기에서, 플라즈마의 전기적 도전성 변화에 따른 정합 특성의 열화를 최소화할 수 있는 도파관 부를 설계하여 안정적으로 동작되도록 하였다. 최종적으로 2.45 GHz 알루미늄 도파관 시스템을 제작하고, 400 W급 마그네트론을 사용한 가시광 방출 실험을 통해 설계된 시스템의 타당성을 검증하였다.

Abstract

In this study, a waveguide system for focusing the electric field is presented to emit the microwave-driven plasma visible light. This system consists of a magnetron for the microwave power supply, the waveguide section for power propagation, and the mesh-type cavity reactor. The quartz bulb containing a dose of sulfur powder and buffer gas Ar is located in the reactor, and forced by the strongly concentrated electric field for generating and exciting the sulfur plasma. That is, the conductor tips are loaded on each inner wall of the waveguide and the reactor, and then the plasma bulb is positioned between the tips, hence focusing the strong electric field on the bulb. Furthermore the waveguide section is designed for minimizing the degradations of matching characteristics according to the variations of the electrical conductivities of plasma at the transitory phase for plasma generation, hence providing the stable operation. Finally, the 2.45 GHz aluminum waveguide system is constructed, and then experiments for emitting the visible light are performed by using 400 W-class magnetron, showing the validity of designed system.

Key words : Waveguide, Cavity Resonator, Plasma, Electric Field Focusing

I. 서 론

초고주파에 의해 여기(excitation)되는 플라즈마는

반도체 공정에서의 표면 정화 및 에칭, 폐기물 및 유독성 가스 처리, 가열 및 용접 등에 많이 활용되고 있으며^{[1]~[4]}, 자외선 및 가시광을 만들어내는 방전

「이 논문은 2006년도 정부 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-D00330).」

금오공과대학교 전자공학부(School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

· 논문 번호 : 20090108-006

· 수정완료일자 : 2009년 2월 13일

소스로도 많은 관심을 받아 왔다^{[5]-[9]}. 여기서 가시광 방출 플라즈마는 대개 구(sphere)형 혹은 원통형의, 투명하고 열에 강한 석영 벌브 내에서 생성된다. 즉, 이 벌브는 공동 공진기(cavity resonator)와 같은 반응기 내에 위치되어 있으며, 소량의 수은, WO₂ Br₂ 혹은 황과 같은 플라즈마 생성 물질과, Krypton, Xenon 혹은 Argon(Ar)과 같은 버퍼 가스가 적절한 기압을 유지하며 채워져 있다. 반응기 내부에 강한 정재파 전계를 형성시키면, 버퍼 가스는 전계에 의해 방전을 시작하게 된다. 그 방전 열에 의해 플라즈마 생성 물질은 기화되어 이온화되면서 플라즈마가 생성되고, 이 플라즈마는 지속적인 고전력 초고주파 에너지를 받아 여기되면서 높은 열과 함께 가시광을 발생시키는 평형 상태가 유지된다.

반응기 내의 벌브에 지속적으로 고전력 초고주파를 공급하기 위해서는 마그네트론과 같은 전력 공급기와 효율적인 전력 전송을 위한 도파관이 필요하다. 따라서 1) 전력 공급기와 도파관과의 결합 방법, 2) 벌브가 삽입된 반응기와 도파관과의 결합 방법, 3) 플라즈마 상태 변화에 적용할 수 있는 안정화 방법 등이 고려되어야 한다. 이들 방법들은 근본적으로 임피던스 정합 문제에 귀착된다. 그러나 본 연구에서 사용할 상용 마그네트론은 발전된 신호를 프로브 안테나로부터 출력되도록 구성되어 있으므로, 이 프로브의 기하 구조는 정해져 있으며, 프로브에서 마그네트론 내부 쪽으로 들여다 본 임피던스 도출이 용이하지 않다. 따라서 이 프로브를 도파관에 삽입시켜 급전시킬 경우, 상기 임피던스 정합 문제에서 제한 요소가 된다^[10]. 또한, 반응기 내부에 정재파가 형성되면, 이 반응기 내에 위치한 벌브 내부에서 플라즈마 형성 및 가시광 발생까지의 과도기를 거치게 되고, 반응기 입력 임피던스는 플라즈마의 전기적 도전성 변화에 의해 크게 변화될 수 있다. 즉, 플라즈마 도전성의 시변 섭동(perturbation)^[11]에 의해, 플라즈마로부터의 반사 크기가 시간적으로 변화하게 되고, 반응기 내부의 정재파 공진 특성이 변화함으로써 불안정한 동작을 유발할 수 있다. 그러므로 마그네트론 임피던스 혹은 벌브내의 플라즈마 상태에 안정적으로 적응될 수 있고, 동시에 반응기 내부의 벌브에 효율적으로 전계를 집중시킬 수 있는 도파관 구조가 필요하다.

본 연구에서는 우선 일반적으로 많이 사용하는 슬롯에 의한 도파관 및 공동 공진기(반응기) 결합 구조를 이용한 시스템 특성을 분석함으로써, 그 구조가 갖는 정합 문제에 기인한 공급 전력의 한계점을 보이고, 이를 보완하기 위해, 전계를 벌브에 집중시킬 수 있는 구조의 도파관 시스템을 제안하였다. 즉, 도체 튜브를 도파관과 반응기 내부의 적절한 위치에 대향하도록 장착시키고, 그 중간에 벌브를 삽입시킴으로써, 벌브에 전계를 집중시키도록 하였다. 또한, 시변 플라즈마 상태에 크게 의존하지 않는 반사 특성을 가지도록 도파관부를 설계하였다. 여기서 설계 및 분석을 위해 상용 HFSS 툴을 사용하였으며, 시뮬레이션에 필요한 플라즈마의 전기적 특성을 위해 기존의 황 플라즈마에 대한 연구 결과를 참조하였다. 실제로 황 플라즈마는 높은 플라즈마 효율, 긴 수명 및 우수한 연색성을 가지며, 거의 자연광에 가까운 가시광원으로 많은 주목을 받고 있다^{[9],[12]}. 최종적으로 15 mg의 황 분말과 1 bar Ar 가스가 내부에 밀봉된 석영 플라즈마 벌브($\epsilon_r = 3.7$)와 2.45 GHz 상용 400 W급 마그네트론을, 실제로 제작한 도파관 시스템에 활용하였고, 가시광 방출 실험을 통해 설계 시스템의 타당성을 보였다.

II. 플라즈마의 전기적 특성

일반적으로 플라즈마에 공급되는 전계 에너지로부터 열과 광 복사를 유발하는 에너지 수송(transport) 관계는 LTE(Local Thermodynamic Equilibrium) 모델^{[12],[13]}로부터 다음과 같이 일차원적 에너지 밸런스 메커니즘으로 근사화될 수 있다.

$$\frac{1}{2} \alpha(r) E(r)^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial}{\partial r} T(r) \right) + \int_0^\infty 4\pi j_\nu(r, \nu) - \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} K_\nu(r, \nu) I_\nu d\Omega \quad (1)$$

여기서 $E(r)$ 은 벌브 중심에서 r 만큼 떨어진 벌브 내 임의점에서의 전계, λ 는 열역적(thermal) 전도도, σ 는 전기적 도전율, T 는 절대 온도, j_ν 는 광 방출(emission) 계수, κ_ν 는 스펙트럼 흡수(absorption) 계수, 그리고 I_ν 는 단위 입체각(Ω)당 광 복사 세기를 의미한다. 예로서 황 플라즈마인 경우, 기존의 실험적 연구 결과^{[9],[12]}에 따르면 기체 상태에서의 황은

대부분 S_2 , S_{3-8} 인 분자들과 S 원자들의 조합으로 이루어지며, 이들의 조성 비율은 온도와 기압에 따라 바뀌게 된다. 그 중에서 S_2 분자는 850~950 K 이상의 온도에서 매우 우월한 조성비를 가지며, 황량에 따라 대개 수 bar 정도의 기압을 형성시켜 밸브 내부 기압에 가장 큰 영향을 준다. 즉, 이런 조건에서는 S_{3-8} 분자들은 대부분 해리되면서 S_2 분자 상태로 가게 된다. 온도가 2,000 K 이상에서는 전자(electron) 및 S^+ , S^- , S_2^+ , S_2^- 등의 이온들이 생성되고, 이 중 전자 밀도가 지배적인 것으로 알려져 있다. 또한, 플라즈마 가시광 방출에 필요한 초고주파 발생기 전력은 사용하는 도파관 구조와 전송 효율에 따라 차이가 있을 수 있으나 대개 200 W 이상이 요구되고, 인가 전력을 증가시키에 따라, 밸브 내부의 플라즈마 생성 물질의 양에 따른 내부 기압의 한계에 의해 전자 농도는 포화 상태에 도달하게 된다. 따라서 인가 전력 대비 광 효율을 감안한, 전자에 의한 최대 도전율은 밸브 제원에 따라 다를 수 있으나, 대개 1.2 S/m 전후로 알려져 있다^{[12],[14]}.

식 (1)의 좌변은 근사적으로 플라즈마에 구성된 전자들에 의한 오옴손 밀도를 의미하고, 황 분자 및 원자들이 여기되면서 발생하는 열 및 광량과의 평형 관계는 전자에 의한 오옴손과 관계됨을 알 수 있다. 그러므로 플라즈마의 전기적 특성은 밸브 내의 도전율로 나타낼 수 있다. 이 도전율은 다음과 같이 일반적인 플라즈마의 복소 유전율^[15]로부터 표현될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_0 \left[1 - \frac{X}{1+Z^2} - j \frac{ZX}{1+Z^2} \right] \quad (2)$$

위 식에서 괄호 내의 실수부와 허수부는 각각 ϵ_r' , ϵ_r'' 로 둔다. 여기서 $X = (\omega_p/\omega)^2$, $Z = \nu_{en}/\omega$ 이며, ω 는 인가 신호의 각주파수, ω_p 는 플라즈마 각주파수, ν_{en} 은 중성 입자와 전자간의 충돌(collision) 각주파수이다. 그리고 $\omega_p = \sqrt{q^2 N/m\epsilon_0}$ 를 의미한다. 여기서 N , q , m 각각은 전자 농도, 전자의 전하량 및 질량을 의미한다. 실제로 $\nu_{en} \gg \omega$ 의 관계가 있으며, N 이 작으면 식 (2)는 $\epsilon \approx \epsilon_0$ 이 되어 투명하게 되고, N 이 매우 커지면 근사적으로 $\epsilon \approx -j\epsilon_0 \epsilon_r''$ 로 간주될 수 있다. 이때 $\epsilon_r'' = \sigma/(\omega\epsilon_0)$ 이며 loss tangent로 표현되므로, 도전율은 $\sigma = q^2 N/(m\nu_{en})$ 로 정의될 수 있다. 식 (1)의 도전

율은 밸브 중심에서부터 거리 r 의 함수로 표현되나, 실제로 밸브에 인가되는 전계의 세기 값을 모르는 상태에서 전자 농도 및 분포를 산출하기에는 어려운 점이 있고, 또한 중력에 의해 밸브 내의 농도가 불균일하게 분포될 수 있으므로 실제 제작 및 실험 시 모터를 이용하여 밸브를 회전시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 밸브 내의 도전율이 균일하게 분포된다고 가정하고, 이 도전을 변화에 따른 반응기 내부의 공진 특성을 분석하고, 그 결과를 설계에 적용하였다.

III. 도파관 시스템 분석

공동 공진기 급전 방식 중 슬롯을 통한 급전 방식은 스테르브 혹은 도파관 길이 가변 등의 동조 방식을 적용하기에 용이한 장점을 가지므로, 일반적으로 많이 사용하는 방식^{[14],[16]}이다. 따라서 시스템 분석을 위해 채택한 기본 구조는 그림 1과 같다. 이 시스템은 초고주파 전력 공급을 위한 마그네트론, 전력 전송을 위한 도파관, 슬롯, 원통형 공동 공진기, 공진기 내부에 삽입된 석영 플라즈마 밸브 등으로 구성된다. 이때 밸브는 외부에서 삽입이 용이하도록 석영 rod 끝에 부착되어 있다. 공진기는 서론에서 언급한 반응기에 해당하며, 빛 방출을 용이하게 하기 위해 파장보다 매우 작은 구멍들을 갖는 mesh형으로 구성될 수 있다. 기본 공진 모드가 TE₁₁₁ 모드인 원통형 공동 공진기는 공진기 중앙에서 가장 센 정재파 전계가 형성되고, 플라즈마 밸브를 삽입하기에

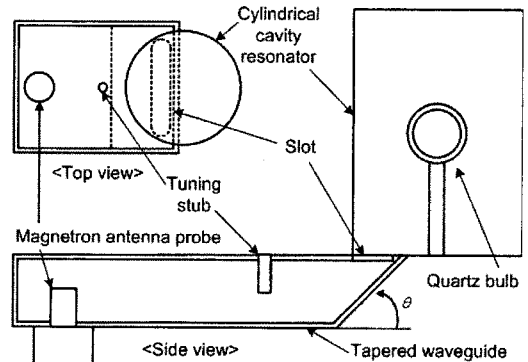


그림 1. 슬롯에 의해 결합된 공동 공진기 시스템 예
Fig. 1. Example of cavity resonator system coupled by slot.

용이한 구조를 가진다. 도파관 급전은 마그네트론 프로브에 의해 이루어지며, TE₁₀ 모드를 주 전송모드로 채택하였다.

상용 HFSS 소프트웨어 툴을 사용하여 분석하였으며, 정합 특성 분석을 위해 마그네트론 프로브를 동축 선로 내부 도체로 간주하고 프로브 인가 위치를 기준 포트로 지정한 후 반사 특성을 산출하였다. 실제로 마그네트론 프로브로부터 마그네트론 쪽으로 들여다 본 임피던스(Z_p)는 마그네트론 구동 전력 및 도파관으로부터의 반사와 영향에 의해 가변될 수 있으므로, 본 연구에서는 프로브 임피던스 값을 임의로 설정한 후 공진 특성을 분석하였다. 이때 프로브 중앙과 도파관 단락면 간의 거리는 14 mm로 고정시키고, 2.45 GHz 신호 전송에 적합한 WG 9A 형 도파관(86×43 mm)을 적용하였다. 또한, 반복 시뮬레이션을 통해 도출한 공동 공진기의 반경과 높이는 각각 39 mm 및 118.7 mm이다. 이 결과는 공동 공진기 내부에 삽입된 유전성 석영 벌브($\epsilon_r = 3.7$, 반경: 16 mm, 두께: 2 mm)와 슬롯(폭: 13.44 mm, 길이: 60.41 mm)에 의한 공진 주파수 섭동을 고려하여 도출된 수치이다. 도파관 길이가 120.67 mm일 때 프로브 입력 포트에서 산출한 반사 특성을 그림 2에 보였다. 이 시스템은 1-포트 공진 시스템이며, TE₁₁₁ 모드 공진기의 정해진 크기에 기인하여 프로브 임피던스 Z_p 의 변화에 따른 공진 주파수 변화는 크지 않음을 알 수 있으며, 실제로 제작한다면 동조 스테브 혹은 도파관 테이퍼 각도 등의 가변을 통한 미세

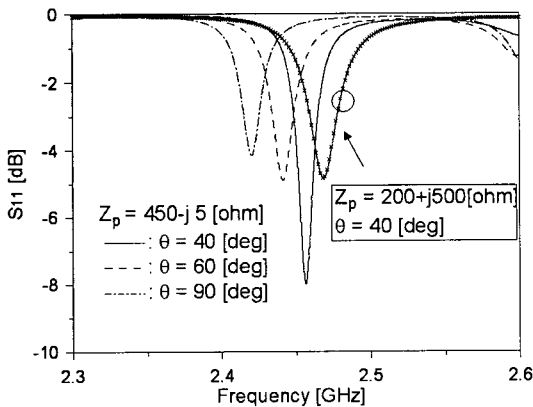


그림 2. 도파관 테이퍼 각도에 따른 정합 특성
Fig. 2. Matching characteristics according to waveguide taper angles.

조정이 가능하다.

벌브 내부의 플라즈마의 전기적 도전성에 의해 야기되는 반사 특성도 분석되어야 할 필요가 있다. 왜냐하면 공동 공진기 내에서 벌브 내의 도전성이 증가하면 도전성 매질로 간주되어 도체에 의한 섭동^[11]이 발생함으로써 공진 Q 값 저하를 유발한다. 실제로 벌브 내의 도전성 변화에 따른 공진 특성을 그림 3에 보였다. 벌브 내부가 투명한 경우($\sigma=0$)는 초고주파 전력이 공급될 때 초기 상태를 의미하며, 플라즈마 도전성이 증가되어 가는 과도기에서 공진 특성이 크게 변화함을 확인할 수 있다. 그림 4는 벌브 내부의 도전성에 따른 공동 공진기 중앙에서의 최대 전계 강도를 도시한 것이다. 이 값들은 시뮬레이션을 위해 입력 포트에서 1 W를 입력시켰을 경우에 대한 상대적인 수치이다. 만약 실제 입력 전력을 P_i 라면, 전계는 $\sqrt{P_i}$ 배가 된다. 벌브 외벽에 작용하는 전계가 가장 세다는 것을 알 수 있으며, 벌브 내벽에서의 초기 전계는 약 4.5 kV/m이고, 중심에서는 약 5.0 kV/m이다. 이 전계($\times\sqrt{P_i}$)가 지속적으로 공급되면, 발생 열의 증가와 함께 도전성이 증가하면서 반사가 증가하게 되고, 도전율이 임의로 설정한 1.0 S/m에 도달하면 Q 값 저하에 기인하여 인가 전계가 매우 작아지면서 벌브 내벽에 약 0.1 kV/m의 전계가 작용하게 된다. 이렇게 되면 다시 발생 열이 감소하면서 도전성이 감소하게 되고, 위에서 언급한 평형 상태에 도달할 때까지 도전율의 증가와 감소가

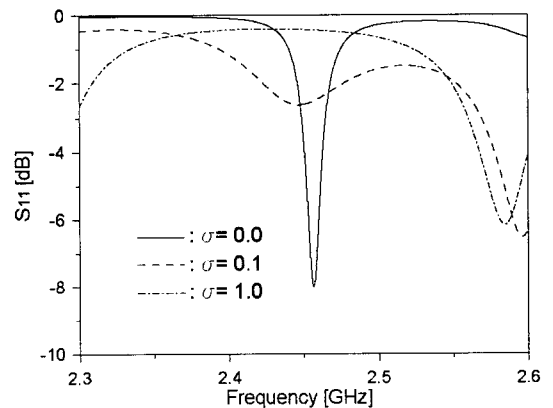
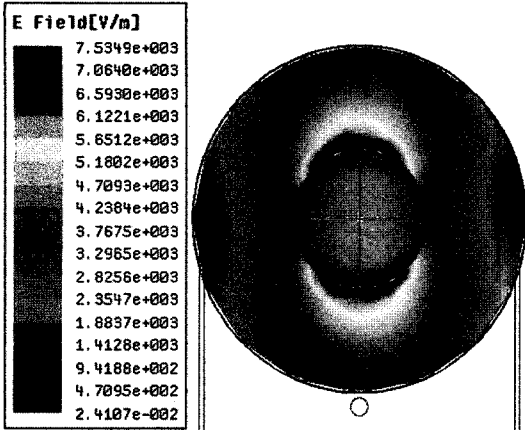


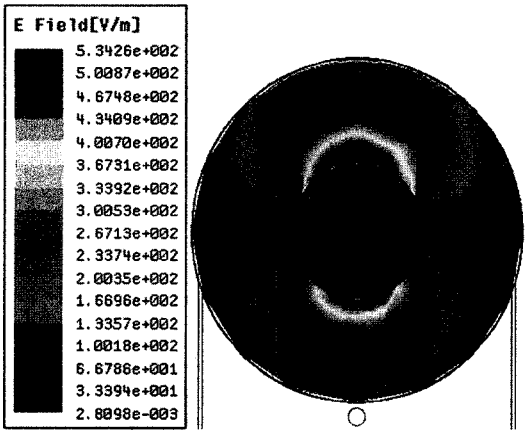
그림 3. 플라즈마 벌브 내의 도전율[S/m] 증가에 따른 반사 특성
Fig. 3. Reflection characteristics according to conductivity[S/m] increment in plasma bulb.

IV. 전계 집중형 도파관 시스템

도파관 단락면으로부터 TE₁₀ 모드 전계가 가장 센 위치까지의 거리를 l_m 이라면, 그 위치의 도파관 윗면에 그림 5와 같이 끝이 뾰족한 원뿔형 도체 팁(tip)을 부착하고 마주 보는 도파관 아랫면에 개구(aperture)를 뚫어, 그 개구면에 강한 전계가 작용할 수 있는 구조를 제안하였다. 이때의 도파관 크기는 제작을 고려하여 72×17 mm로 두고, 반복 시뮬레이션 결과 도출한 l_m 은 33 mm이다. 팁의 원뿔 표면에 수직으로 작용하는 전계가 개구면으로부터 누설됨을 방지하고 빛 방출을 용이하게 하기 위해, 차폐망(shielding mesh)을 설치하고 위 팁에 대항하는 위치에 또 다른 팁을 차폐망에 부착시키면 각 원뿔 도체 표면간에 강한 전계가 집중될 수 있음을 다음에 보였다. 따라서 차폐망 내부에 집중되는 전계는 일반적인 공동 공진기 내부에 존재하는 모드와는 다르므로, 차폐망은 공동 공진기 형상은 하고 있으나, 차폐 및 대항하는 팁 설치에 용이하도록 하는 반응기 역할을 하게 된다. 이 팁들은 전계 프로브의 형상



(a) 벌브 내부의 도전율이 $\sigma=0$ 인 경우
(a) Case that conductivity inside bulb is $\sigma=0$



(b) 벌브 내부의 도전율이 $\sigma=1.0[S/m]$ 인 경우
(b) Case that conductivity inside bulb is $\sigma=1.0[S/m]$

그림 4. 원통형 공동 공진기 중간 면에서 계산된 전계의 세기

Fig. 4. Electric field intensities calculated at center plane of cylindrical cavity resonator.

반복되는 과도기를 거친다. 따라서 원통형 공동 공진기를 반응기로 사용할 경우 그 구조적인 공진 특성에 의해 벌브 내의 최대 평균 도전율은 약 1.0 S/m 전, 후라고 판단된다. 벌브 내의 황량, 기압 및 사용하는 반응기 형태 등에 따라 평형 상태에서 벌브에 작용하는 전계의 세기는 달라지므로, 정확한 필요 전계를 산출하기에는 어려운 점이 있다. 따라서 주어진 P_i 에 대해 반응기 내의 벌브에 작용하는 전계의 세기를 상대적으로 강하게 집중시킬 수 있는 도파관 시스템을 다음 절에서 논하였다.

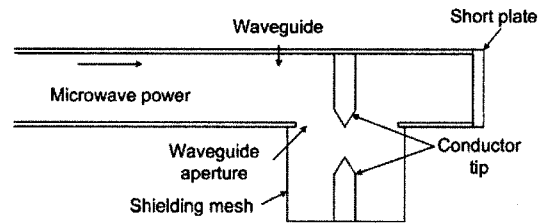
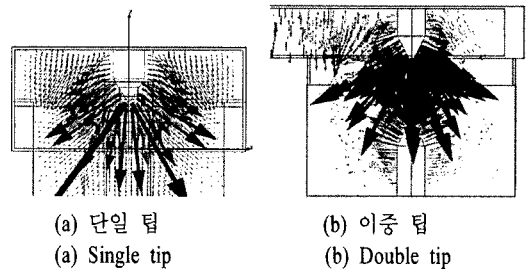


그림 5. 도체 팁을 사용한 도파관 구조

Fig. 5. Waveguide configuration using conductor tips.



(a) 단일 팁 (a) Single tip
(b) 이중 팁 (b) Double tip

그림 6. 도파관 및 반응기 내벽에 부착된 팁 주변의 전계 벡터

Fig. 6. Electric field vector at near tips attached on inner wall of waveguide and reactor.

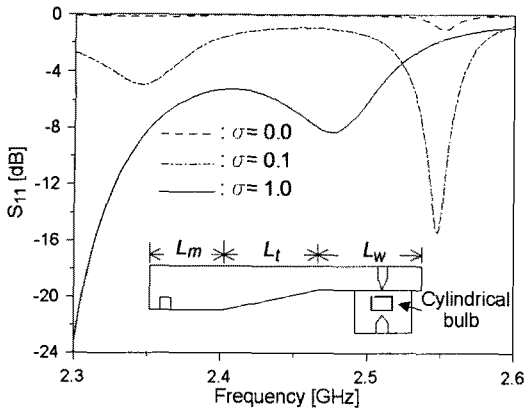


그림 7. 테이퍼형 임피던스 변환기를 사용한 시스템의 정합 특성
 Fig. 7. Matching characteristics of system using tapered impedance transformer.

[17]을 도파관에 적용한 것으로서, 그림 5의 왼쪽으로부터 초고주파를 입사시키면 그림 6과 같이 팁 주변에 강한 전계가 형성될 수 있다. 그림 6(a)는 다음에 설명될 그림 7 구조에서 단일 팁을 사용한 경우 도파관측에서 들여다 본 전계 벡터이며, 그림 6(b)는 그림 8 구조에서 측면으로부터 본 전계 벡터를 도시한 것이다.

그림 5의 도파관에 전력을 공급하기 위한 구조는 다양할 수 있으며, 그 중 테이퍼형 도파관을 임피던스 변환용으로 사용하여 검토한 결과를 그림 7에 보였다. 왼쪽 마그네트론 급전부 도파관 단면은 72×34 mm이며, 도파관 길이 L_m , L_t , L_w 는 각각 87.4 mm, 116.5 mm, 116.5 mm로 두었다. 그리고 직사각형 도파관 부의 개구 직경은 50 mm이며, 도체 팁의 반경 및 원뿔 높이는 각각 5 mm로 두었다. 또한, 팁 간의 간격은 26 mm이고, 그 중간에 외부 직경이 22 mm, 두께가 2 mm, 길이가 20 mm인 원통형 석영 벌브를 삽입하였다. 이 구조는 벌브 내부의 도전성이 증가하면 손실이 증가함에 따른 등가 부하 저항의 변화에 의해 정합 특성 향상과 대역폭 확장을 보이고 있다. 그러나 초기 전계에 대한 정합 특성은 매우 좋지 못하므로 초기 전력을 공급하기에 어려운 점이 있다. 그러므로 전력이 벌브에 공급되면서부터 공진점이 변화하게 되어 정합 특성이 향상된다고 하여도 불안정하게 동작할 수 있다. 따라서 위에서 언급한 바와 같이 시간의 함수인 도전성 변화에 적응할

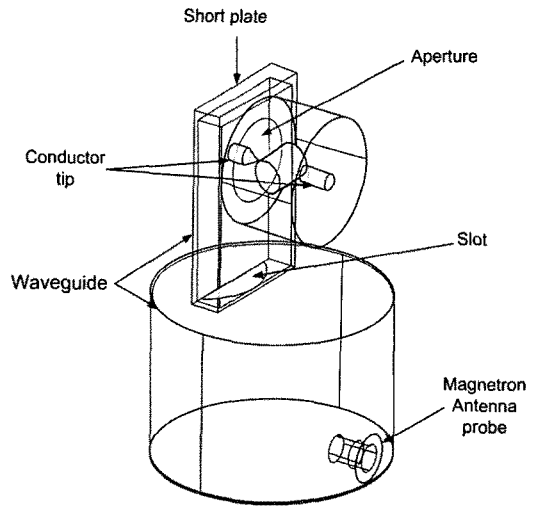


그림 8. 원통형 도파관과 팁이 장착된 도파관 간의 결합 구조
 Fig. 8. Coupling configuration between cylindrical waveguide and tip-loaded waveguide.

수 있을 뿐만 아니라 도파관 내부 및 외부 마그네트론의 전기적 특성이 변화하더라도, 인가 주파수 신호에 안정적으로 동조할 수 있는 도파관 구조가 필요함을 알 수 있다.

이를 위해 개발한 구조는 그림 8과 같다. 이 구조는 반복 시뮬레이션을 통해 결정된 구조로서 원통형 도파관(반경: R , 높이: H)으로부터 반달 모양의 슬롯을 통해 그림 5의 구조를 갖는 팁형 도파관으로 전력이 공급된다. 여기서 $R=70$ mm로 두고, 직사각형 도파관 길이는 $L_w=177.5$ mm로 두었다. 원통형 도파관 중심에서 슬롯 중심까지는 10 mm로 두었다. 또한, 도파관 개구, 팁, 벌브에 대한 제원은 위의 테이퍼 도파관의 경우와 같게 두었다. 이 제원의 수치는 반복 계산에 의해 도출하였으나, 그 수치의 미세한 변화는 반사 특성에 크게 영향을 주지 않는다. 실제 제작을 고려하여, 팁 끝부분은 뾰족하지 않게 반경 0.5 mm의 원형 단면을 갖도록 하였고, 차폐망을 장착시킬 수 있도록 원형 플랜지를 개구면 주변에 두었다. 그림 9는 프로브 임피던스 Z_p 의 임의 변화에 대한 반사 특성을 시뮬레이션한 결과이며, 이로부터 마그네트론 프로브 임피던스의 임의 값들에 대한 공진 특성은 매우 안정적임을 예상할 수 있다. 이때 실제 실험에 사용할 마그네트론의 원

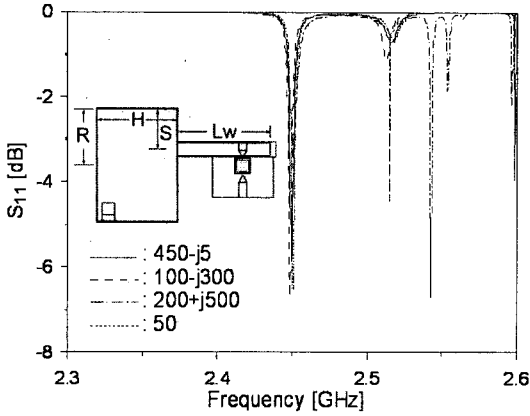


그림 9. $Z_p[\Omega]$ 변화에 따른 정합 특성
Fig. 9. Matching characteristics according to $Z_p[\Omega]$.

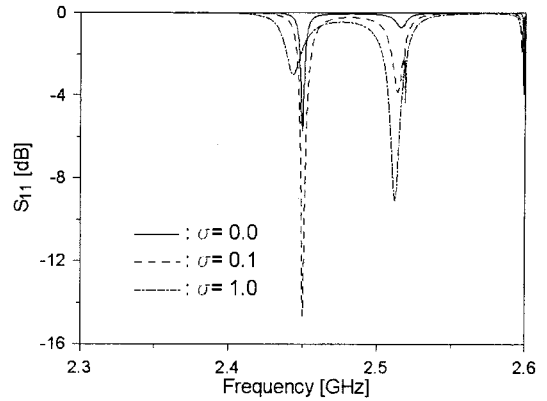


그림 11. 벌브 내부 도전율[S/m] 변화에 따른 정합 특성
Fig. 11. Matching characteristics according to variations of conductivities[S/m] in bulb.

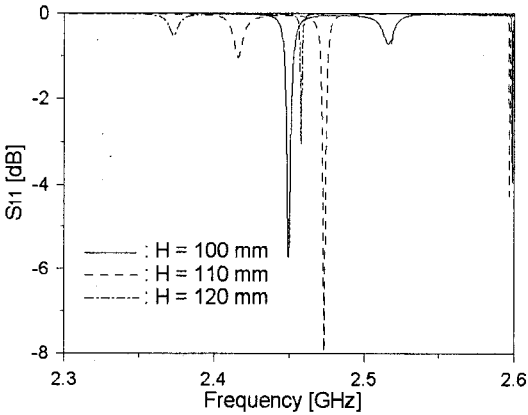
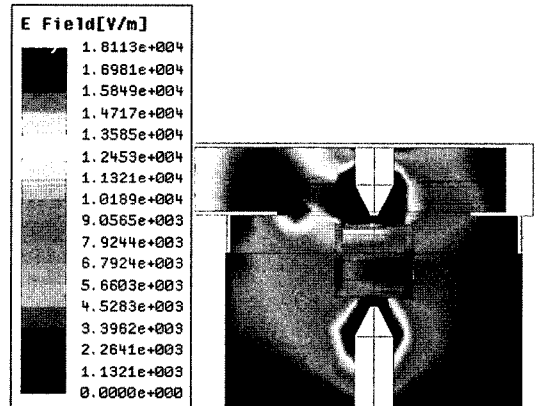
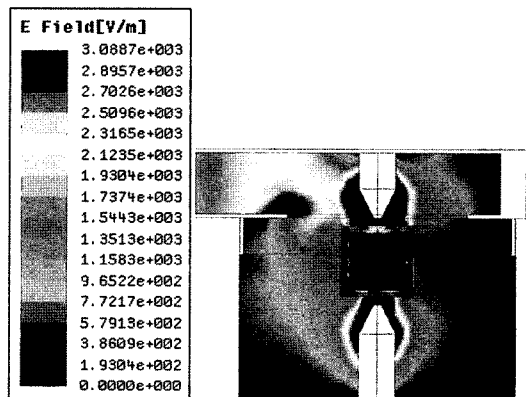


그림 10. 원통형 도파관 높이 변화에 따른 정합 특성
Fig. 10. Matching characteristics according to variations of cylindrical waveguide heights.



(a) 벌브 내부의 도전율이 $\sigma=0$ 인 경우
(a) Case that conductivity inside bulb is $\sigma=0$



(b) 벌브 내부의 도전율이 $\sigma=1.0$ [S/m]인 경우
(b) Case that conductivity inside bulb is $\sigma=1.0$ [S/m]

통형 프로브 크기(반경: 5 mm, 길이: 2.5 cm)를 시뮬레이션에 활용하였고, 50 Ω인 경우 정합 특성 실험에 사용할 동축형 프로브의 크기를 고려하여 반경은 0.5 mm, 길이는 2.5 cm로 두었다. 그림 10은 위의 제원 중에서 원통형 도파관 높이를 변화시킬 경우의 정합 특성을 보인 것이다. 이 그림으로부터 정합 특성의 미세 조정이 요구될 경우 여러 개의 얇은 환형(annular) 도체 적층을 통해 실현될 수 있음을 의미한다. 그림 11은 벌브 내 도전성 변화에 따른 결과로서 정합 특성이 크게 흐트러지지 않음을 알 수 있다. 그림 12는 벌브 내 도전율이 각각 0과 1인 경우, 벌브에 작용하는 전계의 세기를 도시한 것이다. $P_i=1$ W인 경우 벌브 내벽에 공급되는 전계는 초

그림 12. 벌브 주변의 전계 분포
Fig. 12. Electric field distributions at near bulb.

기 상태에서 약 10.0 kV/m이며 중심에서는 약 4.0 kV/m로서 평균적으로 앞 절의 공동 공진기형보다 약 2배 센 것을 알 수 있다. 도전율이 1인 경우 벌브 내벽에 약 0.3 kV/m의 전계가 작용함으로써 공동 공진기형보다 약 3배 정도 강함을 알 수 있다.

V. 제작 및 실험

앞 절에서 보인 그림 8을 실제로 구현하기 위해, 도파관은 알루미늄으로 제작하였으며, 도체 텃은 동(copper)으로 제작하고, 나사로 도파관 내벽 및 차폐망 덮개 중앙에 체결하였으며, 석영 rod 끝에 부착된 벌브는 차폐망에 작은 구멍을 뚫어 텃들 중간에 위치시켰다. 그리고 벌브 내부에 발생하는 플라즈마 농도를 균일하게 분포되도록 하기 위해 모터를 사용하여 회전시키도록 하였다. 또한, 미세 동조를 위하여 원통의 높이를 얇은 환형 도체 띠를 여러 개 만들어 적층을 통해 높이를 조절하도록 하고, 도파관 단락면을 가변시킬 수 있도록 제작하였다. 그림 13에 제작된 도파관 시스템을 보였다.

한편, 마그네트론을 동작시키기 위한 전력 공급은 입력 전류를 감지하여 feedforward 신호로 사용하고, IGBT gate 신호의 duty ratio를 조절하여 전원 회로의 입력 전력이 일정하도록 제어하는 inverter 방식의 전원 회로를 사용하였다. 마그네트론은 출력 전력이 400 W급인 LG 2M214 제품을 사용하였다. 사용한 원통형 석영 벌브(내부 반경: 16 mm, 두께: 2 mm, 길이: 25 mm) 내부는 15 mg 황 분말과 1 bar Ar 가

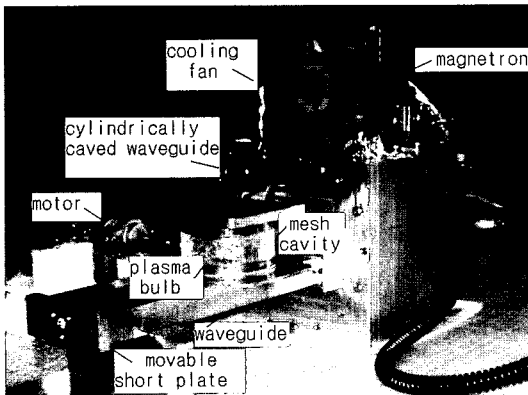


그림 13. 제작된 도파관 시스템
Fig. 13. Constructed waveguide system.

스가 봉입된 것을 사용하였다. 마그네트론 프로브가 삽입되는 입력 포트에 50 Ω 동축 선로 내부 도체를 삽입하여 반사 계수를 측정된 결과를 그림 14에 보였다. 이론값에 대한 대역폭 및 정합 특성의 차이는 주로 도파관 관벽의 손실, 삽입되는 벌브의 크기 및 차폐망 등에 의한 손실에 기인하는 등가 부하 임피던스의 변동에 따른 것으로 추정된다. 그러나 그림 9에서 보인 시뮬레이션 결과와 같이 공진 특성은 프로브 임피던스에 거의 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다. 도파관 시스템이 동작하고 있는 동안 누설된 초고주파를 동축 안테나로 검출하여 스펙트럼 분석기로 측정된 결과를 그림 14에 동시에 보였으며, 정확히 2.45 GHz에서 도파관 내부 공진이 됨을 보이고 있다. 그림 15는 제작된 시스템으로부터의 가시광 방출 장면을 보인 것으로 그림 15(a)는 전력 공

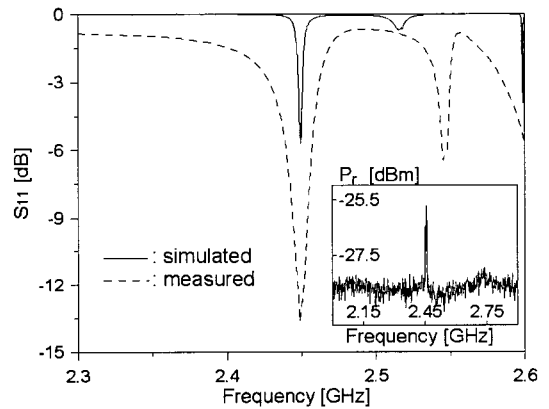


그림 14. 제작된 도파관의 측정된 입력 반사 계수와 공진 주파수
Fig. 14. Measured input reflection coefficient and resonant frequency of constructed waveguide.

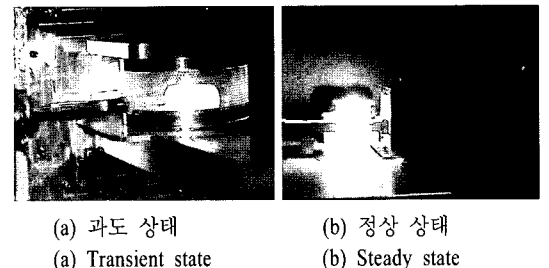


그림 15. 제작된 도파관 시스템의 가시광 방출 사진
Fig. 15. Photograph of visible light emitted from constructed waveguide system.

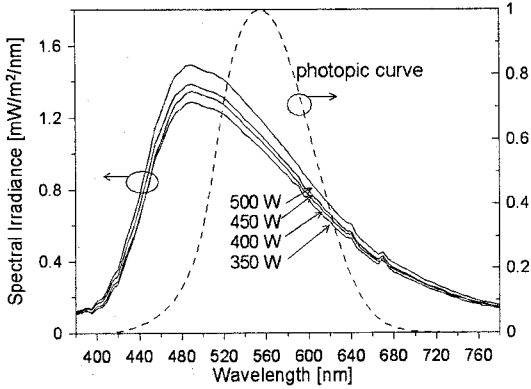


그림 16. 인가 초고주파 전력에 따른 측정된 가시광의 스펙트럼 irradiance

Fig. 16. Measured irradiance power of visible light spectra according to microwave input power.

급 후 약 5초 경과한 후의 플라즈마 과도 상태를 보인 것이며, 그림 15(b)는 약 10초 후의 정상 상태에 도달한 경우를 보인 것이다. 그리고 380~780 nm 범위에서 5 mm 간격으로 측정 가능한 JCS-380 spectrometer를 사용하여, 광원 정면으로부터 30 cm 떨어진 곳에서 측정된 스펙트럼 복사 조도(irradiance) S_λ 를 그림 16에 보였다. 이 그림에 인간의 시각 감도를 나타내는 photopic 곡선(V_λ)의 정규화된 값을 동시에 보였으며, 측정된 S_λ 에 V_λ 를 곱하여 과장에 대해 적분하면 350~500 W 전력 인가시 $3.26 \times 10^4 \sim 4.08 \times 10^4$ lux의 조도(illuminance)의 범위를 갖는다. 연속적인 스펙트럼을 보이고 있고, 인가 전력 변화에 대해 안정적으로 동작함을 알 수 있다. 그러나 최대 광 방출은 490 nm에서 발생하여, V_λ 의 피크가 555 nm에서 이루어짐을 감안하면, 스펙트럼의 shift에 의한 조도 개선이 필요함을 알 수 있다. 이상의 실험 결과로부터, 제안한 도파관 시스템 구조는 마그네트론에 인가되는 전력 변화와 플라즈마의 시변 도전성에 따른 공진 특성이 매우 안정적임을 확인할 수 있다. 그리고 도파관 내부에서 전계를 집중시키는 기존의 방법들은 대개 ridge 도파관 혹은 클라이트론 공진기 구조에서와 같이 좁은 도체 간극을 사용하여 왔으나, 본 연구에서는 도체 팁을 사용한 새로운 형태의 전계 집중 방식이 가능함을 보였다. 본 논문에서는 제안한 도파관 구조의 정상 동작 및 타당성 확인에 국한하였으나, 초고주파-플라즈마 상호 결합 문제에 대한 심도 있는 물성적 연구에 기

반하여, 밸브 형태와 그 내부 물질의 양, 기압, 발생 온도 및 인가 전력 대비 광 효율 등의 적절한 타협을 위한 반복적인 실험을 통한 실용화 기술 및 비교 연구가 요구된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 도체 팁을 도파관 내부의 적절한 위치에 장착하여 전계를 집중시킬 수 있는 구조에 대해 연구하였다. 이 구조는 주어진 초고주파 급전 전력에 대해, 기존의 공동 공진기 내부에 형성되는 최대 전계보다 매우 강한 전계를 집중시킬 수 있음을, 상용 소프트웨어 툴을 사용한 시뮬레이션을 통해 보였다. 특히 가시광 방출을 위한 석영 플라즈마 밸브가, 최대 전계가 형성된 반응기 내에 위치할 경우, 플라즈마 특성을 도전율로 표현함으로써 도파관 시스템의 전기적 특성 분석을 가능하게 하였다. 또한 급전 프로브 임피던스, 과도적인 시변 플라즈마 도전성 변화에 안정적으로 적응할 수 있도록, 경험적인 반복 시뮬레이션을 통해 신호 전송 및 정합을 위한 도파관부를 설계하였다. 실제로 황 플라즈마 밸브가 삽입된 2.45 GHz, 400 W급 알루미늄 도파관 시스템을 제작하고, 안정적인 가시광 방출 실험을 통해 설계 시스템의 타당성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Osepchuk, "Microwave power applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 975-985, Mar. 2002.
- [2] C. M. Ferreira, M. Moisan, *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications*, New York: Plenum, 1993.
- [3] S. R. Wylie, A. Shamma, and J. Lucas, "Microwave plasma system for material processing", *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 33, no. 2, pp. 340-341, Apr. 2005.
- [4] N. K. Podder, E. D. Mezonlin, and J. A. Johnson, "A microwave generated plasma in a tunable resonant cavity for studies of turbulence in weakly ionized gases", *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 29, no. 6, pp. 965-969, Dec. 2001.

- [5] J. E. Simpson, M. Kamarchi, B. Turner, and M. Ury, "Microwave discharge device with TM_{nmo} cavity", *U.S. Patent* 5 361 274, Nov. 1994.
- [6] A. I. Shamma, I. Pandithas, and J. Lucas, "Low pressure microwave plasma UV lamp for water purification and ozone production", *J. Phys D: Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 2775-2781, Jul. 2001.
- [7] S. Offermanns, "Resonance characteristics of a cavity-operated electrodeless high-pressure microwave discharge system", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 7, pp. 904-911, Jul. 1990.
- [8] M. Heintel, M. Neiger, and R. Scholl, "Investigation of the radiation mechanism of microwave excited cluster lamps", *Contrib. Plasma Physics*, vol. 38, no. 3, pp. 419-433, Mar. 1998.
- [9] D. A. Peterson, L. A. Schlie, "Stable pure sulfur discharges and associated spectra", *J. Chem. Phys. (USA)*, vol. 73, no. 4, pp. 1551-1566, Apr. 1980.
- [10] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, IEEE Press, 1991.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 2005.
- [12] C. W. Johnston et al., "A self-consistent LTE model of a microwave-driven, high-pressure sulfur lamp", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 35, pp. 342-351, 2002.
- [13] M. Stambouli, K. Charrada, and J. Damelincourt, "Thermalization of the high pressure mercury lamp positive column during the warm-up phase", *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 23, no. 2, pp. 138-144, Apr. 1995.
- [14] C. W. Johnston et al., "Operational trends in the temperature of a high-pressure microwave powered sulfur lamp", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 35, pp. 2578-2585, 2002.
- [15] K. Minami et al., "Very slowly decaying afterglow plasma in cryogenic helium gas", *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 31, no. 3, pp. 429-437, Jun. 2003.
- [16] LG Electronics Inc., "Waveguide system for electrodeless lighting device", *U.S. Patent* 7 081 707, Jul. 2006.
- [17] M. Shinagawa, T. Nagatsuma, "An automated electro-optic probing system for ultra-high speed IC's", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, no. 6, pp. 843-847, Jun. 1994.

전 후 동



소자 등

2003년: 경일대학교 전자정보공학과 (공학사)
 2005년: 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년~현재: 금오공과대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및

박 의 준



자공학부 교수

1983년: 동아대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
 1990년: 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
 1990년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 전자장 이론 및 안테나, 마이크로파 전송 선로 및 회로 설계 등