

수치해석에 의한 유도결합 플라즈마의 특성연구

김윤택 · 노영수 · 이홍식 · 황기웅*

한국전기연구소 플라즈마응용 연구팀
*서울대학교 공과대학 전기공학과
(1994년 9월 23일 접수)

A Study on the Characteristics of Inductively Coupled Plasma by Numerical Simulation

Y. T. Kim, Y. S. Rho, H. S. Lee and K. W. Whang*

Korea Electrotechnology Research Institute, Plasma Application Team
*Department of Electrical Engineering, Seoul National University
(Received September 23, 1994)

요 약 - 유도결합 플라즈마의 해석식으로는 양극성 확산, 정상상태를 가정한 확산식, 열평형식과 변위전류를 무시한 맥스웰 식을 사용하였다. 해석기법으로는 유한 차분법과 적분법을 축대칭 2차원(R, Z)모델에 적용하였다. 유도결합 플라즈마장치의 RF 전력, 압력, 석영창 두께, 차폐부 높이에 따른 전자온도, 전자밀도, 등가 저항, 등가 인덕턴스, 효율, 결합계수 k, Q-factor의 변화를 구하였다. 특히 등가저항은 진공챔버, 차폐부 및 코일의 손실저항을 고려하여 구하였다.

Abstract - We use diffusion equation and thermal equilibrium equation assumed ambipolar diffusion and time averaged steady state, Maxwell's equation neglected displacement current as analysis equations of inductively coupled plasma. Finite difference method and integration method are applied to axi-symmetry 2-dimension(R,Z) model. The variation of electron temperature, electron density, equivalent resistance, equivalent inductance, efficiency, coupling coefficient k, Q-factor depended on RF power, pressure, thickness of quartz window, height of shielding part of inductively coupled plasma system are calculated. Especially, equivalent resistance include loss resistance of vacuum chamber, shielding part and coil.

1. 서 론

RF를 이용한 플라즈마 발생 방식은 용량결합형(Capacitive Coupled)과 유도결합형(Inductive Coupled)로 나눌 수 있다. 두 방식의 근본적인 차이는 플라즈마에 에너지가 전달되는 수단인데 용량결합형은 교류전계(E-mode), 유도결합형은 교류자계(H-mode)를 이용한다. 기존의 RF 플라즈마 장치는 대개 용량결합방식이며 이방식에 대해서는 많은 연구가 진행되었고 반도체 공정용 식각, 증착 등의 장비로 널리 사용되고 있다. 유도결합방식은 1884년 Hittorf[1]에

의해 발견되어 기초실험, 이론 연구가 진행되기는 하였으나 크게 주목 받지는 못하였고 주로 압력 수 torr 이상의 유도결합형 아크토치에 대한 연구가 진행되었다.

최근 반도체의 집적도 향상에 따라 공정장비는 낮은 동작압력(수 mtorr), 고밀도 플라즈마(10^{11} cm^{-3} 이상), 낮은 이온에너지, 플라즈마 발생원과 바이어스 전압 원과의 분리, 대구경, 균일도, 저오염 등의 특성이 요구된다. 이에 따라 기존의 용량결합형의 개선 형태로 2대의 RF 전원으로 동작하는 TRIODE, 자장을 인가한 MERIE(Magnetic Enhanced Reactive Ion Etching)

등과 자장 875 gauss에서의 마이크로웨이브(2.45 GHz)와 전자의 공진 현상을 이용한 ECR(Electron Cyclotron Resonance), Helicon Wave 현상을 이용한 방식들이 연구되고 있다. 전자의 두 방식은 기존 방식에 비해 플라즈마 밀도를 증가시킬 수는 있지만 근본적으로 고밀도 플라즈마를 얻기 힘들고 후자의 두장비는 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있는 반면에 균일한 플라즈마를 얻기 힘들다. 이에 반해 저압력(수 mtorr)에서 평판형 코일(spiral coil)을 이용한 유도결합방식에 의해 10^{12} cm^{-3} 이상[2]의 플라즈마 밀도와 지름 20 cm에 균일도 3.5%[3]를 얻을 수 있음이 보고되었고 현재 활발히 연구가 진행되고 있다.

용량결합형의 부하 저항은 대개 50Ω 이상으로 부하에는 고전압, 저전류가 인가되지만, 유도결합형의 부하저항은 50Ω 이하로 부하에 저전압, 고전류가 인가 되어야 하므로 RF 전원을 인가하는 코일 및 정합회로의 저항손과 진공챔버 및 외부 지지물에 유기되는 유도전류의 저항손이 크다. 기본적으로 유도결합형은 플라즈마가 존재하지 않아도 폐회로가 구성되며 위와 같은 손실 성분이 부하저항으로 작용하며 용량결합형에 비해 RF 전원과 플라즈마와의 결합성이 약하여 장비 변수(공정압력, RF 전력 등)의 순시적인 변동에 민감하다. 이와 같은 단점을 개선하기 위해서는 Q-factor를 증가시켜야 한다.

평판코일 유도결합플라즈마에 대한 해석적 연구는 실험적 연구와 더불어 활발히 수행되기 시작하였다. Kushner[4]는 몬테칼로법을 이용하여 플라즈마를 해석하였고 전자장에 대해서는 유한차분법을 사용하였으나 전자장의 해석 영역을 플라즈마 영역으로 제한하여 장치 외부 구조의 영향을 고려하지 않았고 경계값 설정시 챔버의 유기전류를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전자장의 해석공간을 차폐부 영역까지 확장하였고 장치의 외부 등가회로 변수인 등가 저항, 인덕턴스를 구하였으며 코일, 챔버 및 차폐부에서 소모되는 RF 전력손을 고려하였다. 해석식으로는 플라즈마에 대해 양극성(ambipolar) 확산과 정상상태(steady state)를 가정한 확산식과 열평형식을 사용하였고, 전자장에 대해서는 변위(displacement) 전류를 무시한 맥스웰 식을 사용하였다. 수치해석기법으로는 유한차분법과 적분법을 이용하였다. 동작압력 및 RF 전력 변화에 따른 플라즈마의 등가회로 저항, 인덕턴스와 플라즈마

밀도, 전자온도의 변화를 구하였다. 특히 결합계수 k, Q-factor와 장치의 기하학적 변수와의 관계를 구하기 위해 RF 전원 인가를 위한 창으로 쓰이는 Quartz의 두께 및 RF 차폐부의 높이를 고려하였다. 방전 가스는 아르곤(Ar)이며 RF 전원의 주파수는 13.56 MHz 이다.

2. 해석 모델

평판코일 유도플라즈마 장치의 기본구조는 진공챔버, 석영창, 코일, 차폐부로 구성되어 있으며 개략도는 그림 1과 같다. 평판코일은 spiral 형태이다. 진공챔버의 내경 300 mm, 석영창과 시료 사이의 거리는 100 mm이다. 지름(D_Q) 300 mm 석영창의 최소두께 ($T_{Q, \min}$)는 식 (1)[5]에 의해 5.3 mm 이지만 이것은 외부 충격이 없는 상태에서 가능한 최소 두께이므로 실제 장비에서는 사용할 수 없다. 해석 모델에서는 석영창 두께를 10 mm에서 30 mm까지 변화 시켰고 차폐부의 높이는 50 mm에서 150 mm까지 변화시켰다. 코일은 폭 2 cm, 두께 2 mm의 동선을 4회 감아 외경 240 mm인 형태를 해석 대상으로 하였다.

$$T_{Q, \min} = 1.768 \times 10^{-2} D_Q [mm] \quad (1)$$

코일 및 RF 전원 인가선을 제외한 나머지 구조는 축대칭이므로 해석 모델을 2차원(R,Z)으로 간략화하기 위하여 코일을 회전수 만큼의 동심원으로 가정하였고 인가선에 의한 영향은 무시하였다. 다만 코일에 의한 RF 전력손실을 계산할때 인가선의 길이를 고려하였다. 플라즈마의 해석 영역은 진공챔버영역으로 하였으나 전자장 해석영역에는 차폐부 영역을 포함시켜 해석영역의 모든 경계를 도체가 되게 하였다. 전자장

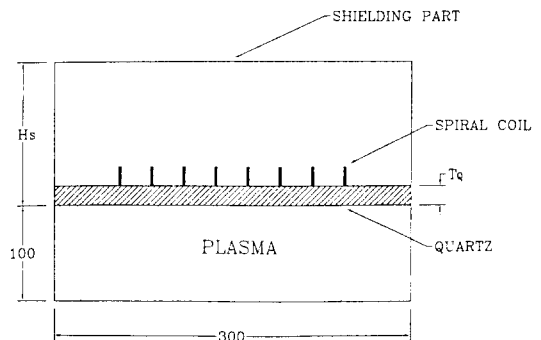


그림 1. 평판코일 유도플라즈마 장치의 개략도.

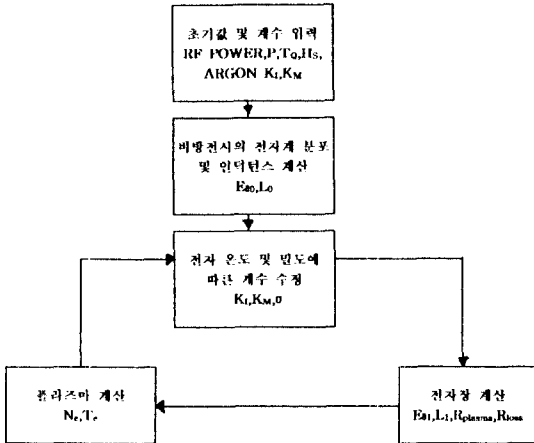


그림 2. 유도결합 플라즈마의 수치해석 기법 개략도.

해석식은 E_0 만을 변수로 하는 식으로 유도되는데 (4.절 참조) E_0 는 경계에 수평이므로 모든 경계값을 $E_0=0$ 로 할 수 있다. Kushner[4]는 전자장 해석 영역을 플라즈마 영역으로 국한하여 플라즈마와 석영창이 접하는 면의 경계값을 코일의 전류와 플라즈마 전류에 의해 구한 E_0 를 사용하였고 반복 계산에 의해 경계값을 보정하여 수렴시켰으나 진공 챔버 및 차폐부에 유기되는 전류를 고려하지 않았으며 고도전율[$\sigma > 0.1 (\Omega cm)^{-1}$]일때 불안정한 수렴 특성을 보인다. 이 모델에 의해서 플라즈마 등가 저항을 구할 수는 있지만 등가 인덕턴스를 구할 수 없고 차폐부의 RF 전력손을 구할 수 없다.

본 연구에서 사용한 수치해석 기법의 개략도는 그림 2와 같다. 플라즈마, 전자장 식에 유한차분법을 적용하였고 ADI(Alternative Directional Implicit)법을 이용하여 각 식의 해를 구했으며 계수 및 항을 보정하고 수렴할때 까지 반복 계산하였다.

3. 플라즈마 해석

유도결합방식의 플라즈마 발생장치에도 코일 전압에 의한 용량결합 현상이 일어나지만 코일을 Faraday 차폐하면 이 현상을 제거할 수 있으므로 본연구에서는 유도결합 현상에 대해서만 고려하였다. 플라즈마 해석에 사용된 식은 확산식(2)과 열평형식(3)을 사용하였다. 이 식들은 Richards[6]의 플라즈마 식에 1)양극성 확산, 2)RF 1주기 평균의 정상상태 [$\partial/\partial t \approx 0$],

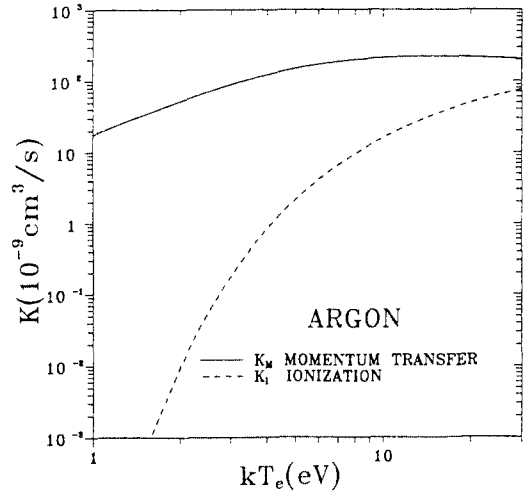


그림 3. 충돌계수(K_i : 이온화, K_m : 운동량 전달).

3) 쉬쓰(sheath) 영역 무시를 가정한 것이다.

$$-D_a \nabla^2 N = K_i N N_n \tag{2}$$

$$-D_a \nabla^2 (N \epsilon_e) - D_e \nabla \cdot (N \nabla \epsilon_e) = -K_i N N_n H_i + Re(\sigma) |E|^2 \tag{3}$$

N 은 플라즈마 밀도로 양극성 확산을 가정하였으므로 전자, 이온의 밀도와 일치한다. D_a 양극성 확산계수, D_e 는 전자의 확산계수, ϵ_e 는 전자의 열에너지, K_i 는 이온화 충돌계수, N_n 은 중성기체의 밀도, H_i 는 이온화 에너지, $Re(\sigma)$ 는 플라즈마 도전율의 실수 성분, $|E|$ 는 전계의 크기이다. D_a, D_e 는 Richards[6]가 사용한 계수들로 중성기체 압력 P 에 대해 $D_a P = 5788 \text{ cm}^2 \text{ torr/sec}$, $D_e P = 1.2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ torr/sec}$ 이고, 플라즈마 도전율 σ 는 저온 플라즈마의 도전율식인 식(4)와 같다.

$$\sigma = \frac{Ne^2}{m_e} \frac{1}{\nu_m + j\omega} \tag{4}$$

ν_m 은 충돌주파수로 운동량 전달 충돌계수 K_m 와 중성기체의 밀도와와의 곱이며($\nu_m = K_m \cdot N_n$), f 는 RF 전원의 주파수, e 는 전자의 전하량, m_e 는 전자의 질량이다.

식(2)의 좌변은 플라즈마의 양극성 플라즈마 밀도 확산을 나타내며 우변은 전자와 중성기체의 충돌에 의한 플라즈마 생성을 나타낸다. 식(3)의 좌변은 전자의 열확산을 나타내며 우변의 첫째항은 중성기체

이온화에 따른 전자 에너지의 감소항이며 둘째항은 저항 가열에 의한 전자 에너지 증가항이다.

충돌계수 K_i, K_m 는 아르곤(Ar) 가스에 대해 실험적으로 구한 충돌단면적[7-8] 계수를 전자가 맥스웰 분포일때를 가정하여 전자의 온도에 대한 계수로 환산하여 그림 3와 같이 구하였다. 이계수 값은 Liberman[9]이 사용한 계수와 거의 일치 한다.

4. 전자장 해석

4.1. 전자장 해석식

전자장 해석의 기본식은 맥스웰 식인 식(5)(6)과 도전율 식(4) 이다.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}_c + \sigma \vec{E} \tag{5}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \tag{6}$$

도전율이 $0.1(\Omega cm)^{-1}$ 일때 RF 전원주파수가 1 GHz 보다 충분히 작으면 변위전류 항을 무시할 수 있으므로 식(5)의 변위전류 항을 무시하였다. \vec{j}_c 는 코일에 흐르는 전류밀도이다. 플라즈마 및 챔버 등 외부 간섭물이 없는 코일만이 존재할 때의 전계 및 자계를 각각 \vec{E}_0, \vec{B}_0 라고 하면 식(7)(8)을 만족하며 \vec{B}_0 를 소거하면 식(9)가 유도된다.

$$\nabla \times \vec{B}_0 = \mu_0 \vec{j}_c \tag{7}$$

$$\nabla \times \vec{E}_0 = -j\omega \vec{B}_0 \tag{8}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = j\omega \mu_0 \vec{j}_c \tag{9}$$

식(9)의 해는 식(10)과 같고 적분법(integration method)[10]에 의해 구할 수 있다.

$$\vec{E} = \frac{j\omega \mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}_c}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv' \tag{10}$$

각각 \vec{E}, \vec{B} 는 각각 $\vec{E} = \vec{E} + \vec{E}, \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$ 으로 나타낼 수 있으며 식(5)-(8)에 대입하여 \vec{B}_0, \vec{B}_1 를 소거하면 식(11)이 유도된다.

$$\nabla^2 \vec{E}_1 - j\alpha^2 \vec{E}_1 = j\alpha^2 \vec{E}_0 \tag{11}$$

$(\alpha^2 = \sigma \mu_0 \omega)$

식(11)의 우측항은 식(10)으로 부터 구할수 있고 미지 변수는 \vec{E}_1 만 남는다. 본 연구에서 다루는 해석

모델이 축대칭이며, 코일의 전류가 원주(θ)방향이므로 전계는 원주방향만 존재하고 자장은 R,Z 방향만 존재한다. 결국 식(11)은 $E_{\theta 1}$ 하나만을 미지수로 하고 코일에 의해 유기되는 $E_{\theta 0}$ 를 강제항(forcing term)으로 하는 식이 된다. 전자장 수치해석 식은 식(10),(11)로 간략화 된다.

경계조건은 제 2.절에서 언급한것과 같이 경계면이 모두 도체이며 전계는 원주방향이므로 경계에서의 전계는 0이다. ($E_0 = E_{\theta 0} + E_{\theta 1} = 0$)

4.2. 플라즈마의 등가회로 임피던스 계산

플라즈마 및 코일 포함한 외부 회로의 등가회로는 그림 4.와 같이 등가저항 R_{plasma} 와 등가인덕턴스 L이 직렬연결 되었다고 볼수 있다. 실험적으로 구할 수 있는 등가회로요소도 이들 두 성분이다.

등가저항 R_{plasma} 는 두가지 방법으로 구하였다. 첫째 코일에 유기되는 전계를 코일 표면을 따라 선적분하여 구한 전압중 실수 성분을 코일의 전류로 나누어 구하였고, 둘째 플라즈마에서 소모되는 RF 전력의 총합을 구하여 $P_{plasma} = R_{plasma} I_{RF}^2$ 로 부터 구하였다. R_{plasma} 을 구하는 두방법은 각각 수식(12),(13) 과 같고 두방법에 의해 구해진 R_{plasma} 의 오차는 최대 1% 미만 이었다.

$$R_{plasma} = \frac{1}{I_{RF}^2} \int_{C_{coil}} Re(E_{\theta 1}) dl \tag{12}$$

$$R_{plasma} = \frac{1}{I_{RF}^2} \int_{V_{plasma}} Re(\sigma) |E|^2 dv \tag{13}$$

식(12)에서 $E_{\theta 1}$ 만을 고려한 것은 $E_{\theta 0}$ 는 허수성분만 존재하여 등가저항과 관계가 없기 때문이다.

등가인덕턴스 L를 구하는 방법은 등가저항을 구하는 첫번째 방법과 비슷하지만 계산시 $E_{\theta 0}$ 를 포함시

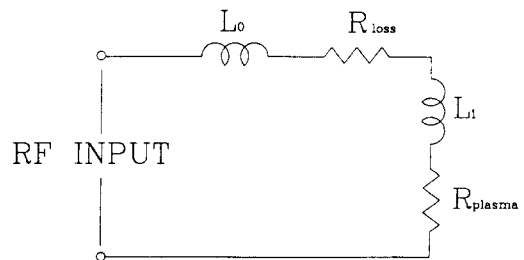


그림 4. 유도결합 플라즈마의 등가회로.

켜야 하는데 수치적분상 코일 표면에서 무한대가 되므로 $E_{\theta 0}$ 에 의한 인덕턴스는 코일표면에서 해석적인 적분을 통해 식(14)와 같이 L_0 를 구하였고 $E_{\theta 1}$ 에 의한 인덕턴스는 식(12)와 같은 방법으로 식(15)을 이용하여 L_1 를 구하여 두인덕턴스의 합으로부터 인덕턴스 $L(=L_0+L_1)$ 을 구하였다.

$$L_0 = \frac{\mu_0}{\omega I_{RF}} \iint \frac{\vec{j}_c(\vec{r}) \cdot \vec{j}_c(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds ds' \quad (14)$$

$$L_1 = \frac{1}{\omega I_{RF}} \int_{C_{coil}} Im(E_{\theta 1}) dl \quad (15)$$

4.3. RF 전력의 손실저항 계산

RF 전력은 코일, 진공챔버 및 차폐부에서 손실된다. 코일에 흐르는 전류는 인가된 RF 전력으로부터 주어지지만, 진공챔버 및 차폐부는 내부표면에 유기되어 흐르는 전류의 양을 구하여 표피깊이(skin depth δ)를 고려한 전력손실로부터 손실저항을 구해야 한다.

$$E_{\theta}(coil) + E_{\theta}(chamber) + E_{\theta}(shielding) + E_{\theta}(plasma) = 0 \quad (16)$$

진공챔버 및 차폐부에 흐르는 전류는 코일, 플라즈마, 진공챔버 및 차폐부의 전류에 의해 유기되는 전계가 진공챔버 및 차폐부 표면에서 0이라는 조건을 이용하면 식(16)이 성립한다. 이식으로부터 진공챔버 및 차폐부 내부표면의 전류 분포가 구해지면 식(17)을 이용하여 손실전력을 구할수 있고 손실저항은 $P_{loss} = R_{loss} I_{RF}^2$ 로부터 구할 수 있다. 코일에 의한 손실저항은 코일연결선의 길이를 보상하여 구하였다.

$$P_{loss} = \int_{S_{chamber}} + \int_{S^{shielding}} + \int_{S_{coil}} \frac{\rho j^2}{\delta} ds \quad (17)$$

비저항 ρ 는 코일(Cu)에서 $1.72 \mu\Omega \cdot cm$ [11] 이고 진공챔버 및 차폐부(SUS304)에서 $72 \mu\Omega \cdot cm$ [12]이다.

5. 해석 결과 및 고찰

유도플라즈마 장치의 해석모델은 RF 전력 300W, 압력 10 mTorr, 석영창의 두께 20 mm, 차폐부의 높이 100 mm, 석영창과 시료 사이의 거리 100 mm 일때를

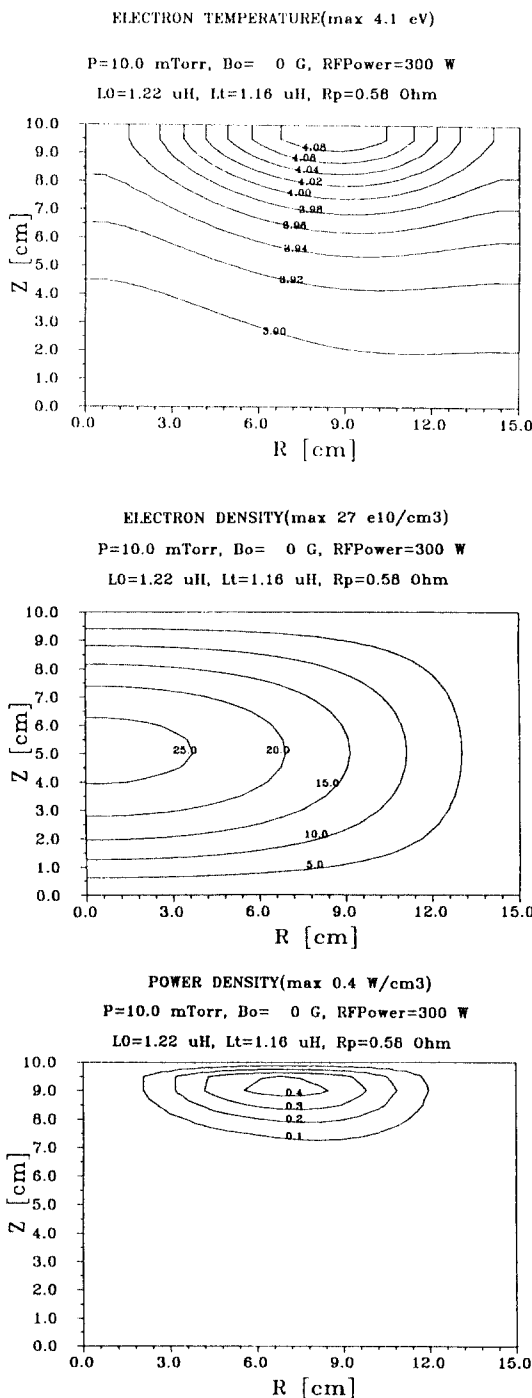


그림 5. 기본모델의 전자온도, 전자밀도, 흡수에너지 밀도 분포
(300W, 10 mTorr, $T_Q=20$ mm, $H_s=100$ mm)
(a) 전자온도 분포 (b) 전자밀도 분포 (c) 흡수에너지 밀도 분포

기본모델로 하였고, RF 전력, 압력, 석영창의 두께를 각각 100~500W, 1~30 mTorr, 10~30 mm, 50~150 mm로 변화시켜 전자의 온도, 밀도, 등가회로 저항, 인덕턴스 및 결합계수 k, Q-factor에 미치는 영향을 구하였다. 결합계수 k, Q-factor는 Godyak[13]의 식 (3), (4)로부터 구하였으며 충돌계수 ν_{eff} 는 플라즈마 영역 충돌계수의 평균을 취하여 사용하였다.

$$k^2 = ((\omega L_1)^2 + R_{plasma}^2) / \omega L_0 (\omega L_1 - R_{plasma} \omega / \nu_{eff}) \quad (18)$$

$$Q = \omega L_1 / R_{plasma} \quad (19)$$

Godyak은 플라즈마 저항을 R_2 로 정의하고 변압기

모델의 2차측 저항으로 정의 하였으나 본 논문에서는 플라즈마 저항을 1차측(코일)에서의 등가 저항 R_{plasma} 로 정의하였으므로 Godyak이 정의한 ρ 와 일치한다. 안정된 플라즈마를 얻기 위해서는 결합계수 k와 Q-factor를 증가시켜야 한다.

그림 5는 기본 모델의 플라즈마 영역 전자 온도, 전자 밀도, 흡수에너지 밀도 분포를 나타낸다. $z=0$ cm는 시료의 위치를 나타내며 $z=10$ cm는 석영창의 위치이다. 전자의 온도는 약 4 eV로 비교적 분포가 균일하고, 전자 밀도는 중심부에서 최대 밀도 $2.7 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 로 시료 표면에서 비교적 균일한 분포를 나

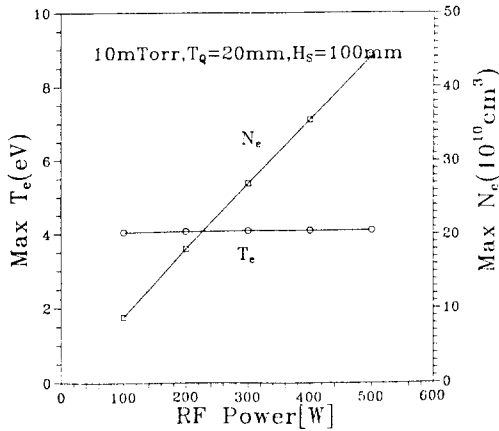


그림 6. 압력에 따른 전자의 최대온도, 최대밀도의 변화.

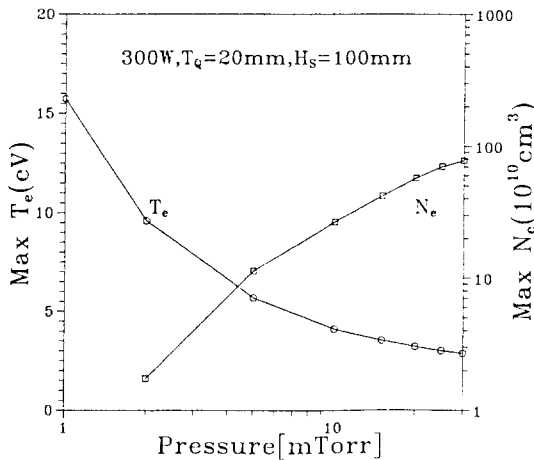


그림 7. RF 전력에 따른 전자의 최대온도, 최대밀도의 변화.

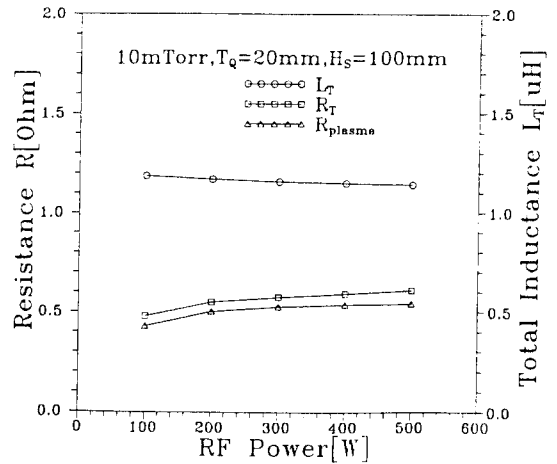


그림 8. RF 전력에 따른 등가 저항과 인덕턴스의 변화.

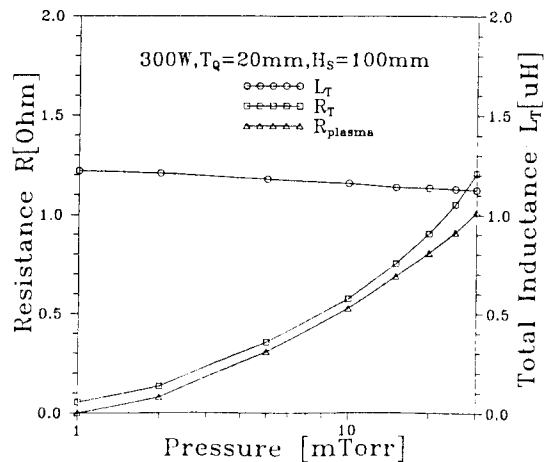


그림 9. 압력에 따른 등가 저항과 인덕턴스의 변화.

타내며, 흡수에너지 밀도는 중심축에서 약 7cm 떨어진 석영창 하단에서 최대이며 석영창에서 멀어질수록 급격히 감소한다. 각 분포는 Kushner[4]의 해석결과와 비슷한 경향성을 나타낸다.

그림 6, 7은 압력과 RF 전력에 따른 전자의 최대 온도, 최대밀도 변화로 압력 증가에 따라 전자온도는 감소하고 전자밀도는 증가하며, RF 전력이 증가함에 따라 전자의 온도는 거의 일정하지만 전자밀도는 선형적으로 증가한다. 이 경향성은 Fukasawa[14]의 실험결과와 거의 일치한다. 석영창의 두께 및 차

폐부의 높이에 대해서는 전자의 최대온도, 최대밀도가 거의 일정하였다. 다만 RF 전력의 플라즈마 내로의 전달효율 차이에 의해 약간의 변화는 있다.

그림 8-11은 RF 전력, 압력, 석영창 두께, 차폐부 높이에 따른 등가 저항과 인덕턴스의 변화를 나타낸다. RF 전력이 증가함에 따라 인덕턴스는 감소하고 저항은 증가하였으나 전반적으로 변화량이 작았다.

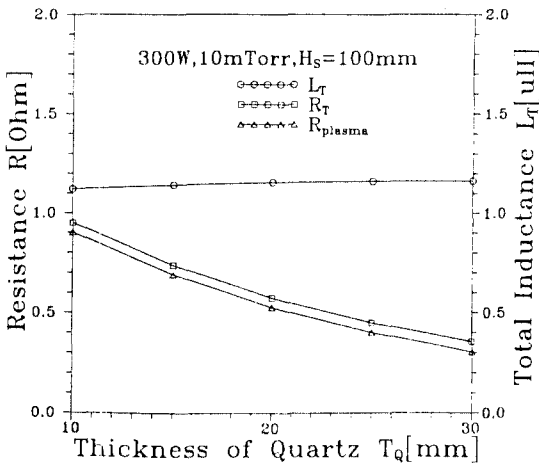


그림 10. 석영창 두께에 따른 등가 저항과 인덕턴스의 변화.

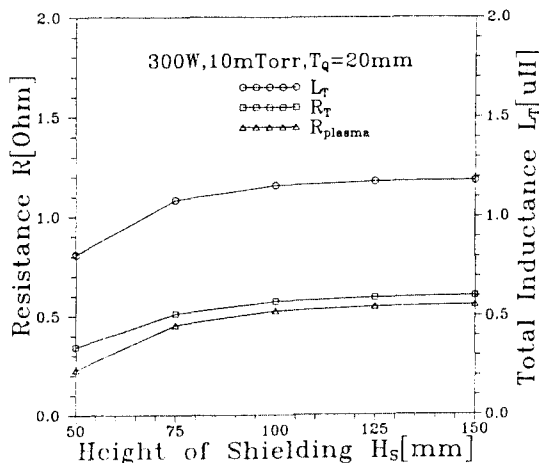


그림 11. 차폐부 높이에 따른 등가 저항과 인덕턴스의 변화.

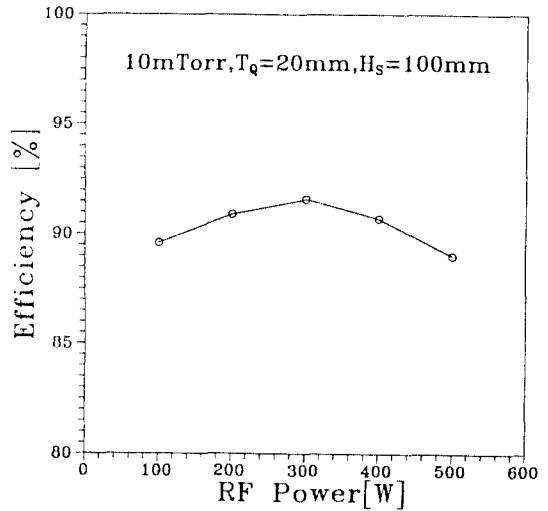


그림 12. RF 전력에 따른 플라즈마로의 RF 전력 전달효율의 변화.

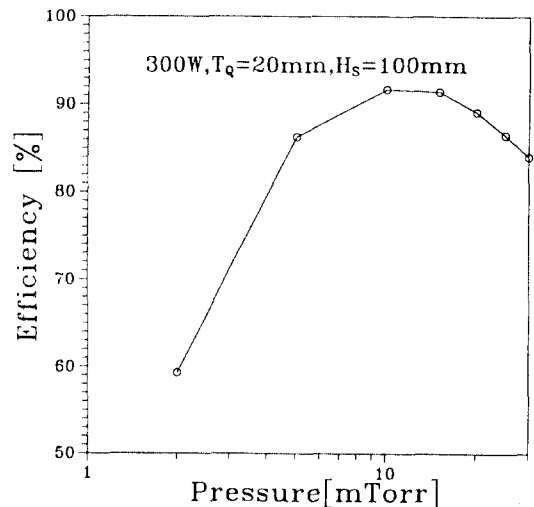


그림 13. 압력에 따른 플라즈마로의 RF 전력 전달효율의 변화.

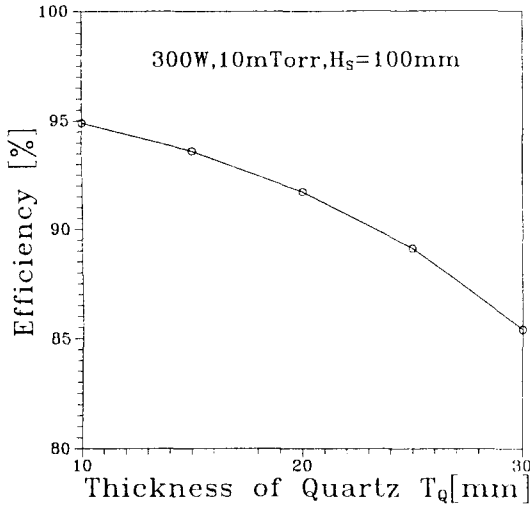


그림 14. 석영창 두께에 따른 플라즈마로의 RF 전력 전달효율의 변화.

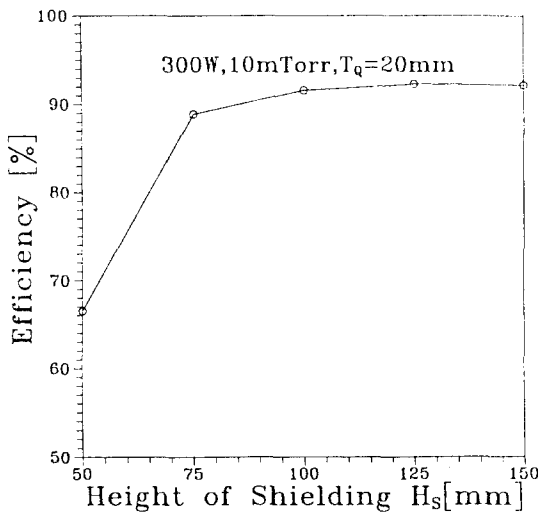


그림 15. 차폐부 높이에 따른 플라즈마로의 RF 전력 전달효율의 변화.

압력 증가에 따라 인덕턴스는 약간 감소하였으나 저항은 급격히 증가하였다. 석영창 두께 증가에 따라 인덕턴스의 변화는 거의 없고 저항은 감소하였다. 차폐부 높이 증가에 따라 인덕턴스, 저항 모두 증가하며 포화되는 경향을 나타낸다. 플라즈마 저항 R_{plasma} 의 증가는 코일과 플라즈마와의 결합성이 좋아지는 것으로 결합계수 k 의 증가를 나타내며 총저항 R_T 와

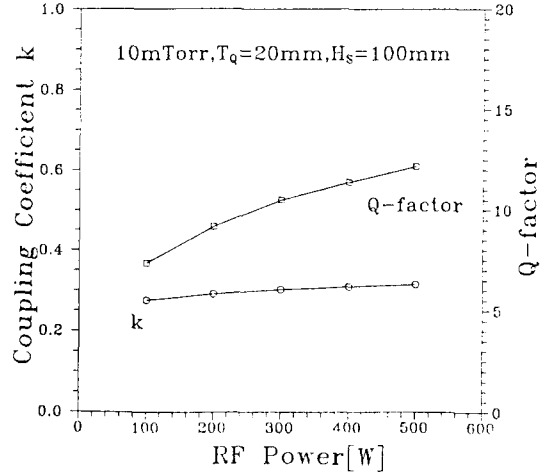


그림 16. RF 전력에 따른 결합계수 k 와 Q-factor의 변화.

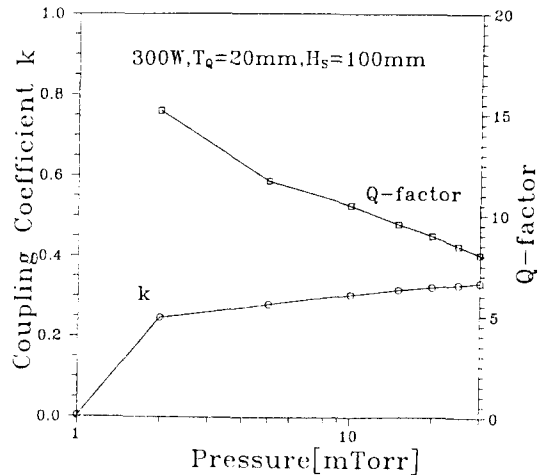


그림 17. 압력에 따른 결합계수 k 와 Q-factor의 변화.

플라즈마 저항과의 차이는 손실저항 성분으로 이 차이의 증가는 손실 전력의 증가를 의미한다.

그림 12-15는 RF 전력, 압력, 석영창 두께, 차폐부 높이에 따른 플라즈마로의 RF 전력 전달효율의 변화를 나타낸다. 전력 300W, 압력 10 mTorr 일때 최대 효율을 나타내며, 석영창 두께의 증가에 따라서는 효율이 감소하고, 차폐부 높이의 증가에 따라서는 효율이 증가하며 포화된다. 압력 1 mTorr인 경우는 플라즈마가 거의 형성되지 않은 상태로 대부분의 RF 전력이 손실되어 효율이 0% 이다.

그림 16-19는 RF 전력, 압력, 석영창 두께, 차폐부

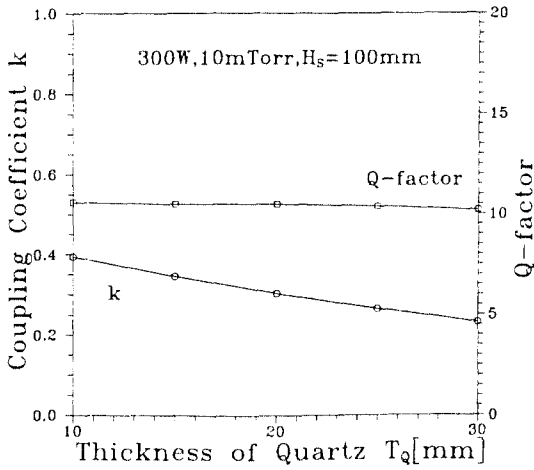


그림 18. 석영창 두께에 따른 결합계수 k 와 Q-factor의 변화.

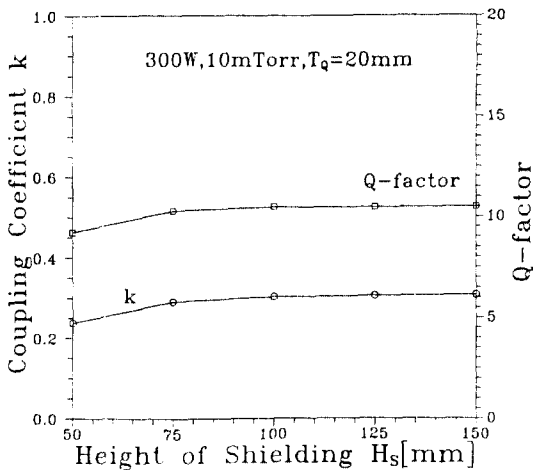


그림 19. 차폐부 높이에 따른 결합계수 k 와 Q-factor의 변화.

높이에 따른 결합계수 k 와 Q-factor의 변화를 나타낸다. RF 전력 증가에 따라 결합계수 k 와 Q-factor 모두 증가하지만 결합계수 k 의 변화는 비교적 작으며 이 경향성은 Godyak[13]의 실험 결과와 같다. 압력 증가에 따라 결합계수 k 는 증가하지만 Q-factor는 감소한다. 석영창 두께 증가에 따라 결합계수 k 는 감소하고 Q-factor는 거의 일정하다. 차폐부 높이 증가에 따라 결합계수 k 와 Q-factor 모두 약간 증가하지만 포화된다.

5. 결 론

본 논문에서는 수치해석 기법을 이용하여 RF 전력, 압력, 석영창 두께, 차폐부 높이 변화에 따른 유도결합 플라즈마 장치의 특성을 구할 수 있었다. RF 전력 및 압력 변화에 대한 전자 온도 및 밀도의 경향성은 기존의 실험논문[13][14]과 일치 하였다. 석영창 두께 및 차폐부 높이에 대한 특성은 유도결합 플라즈마 장치 설계에 좋은 자료가 될 것이다.

등가회로 계수로 구한 저항과 인덕턴스는 비교적 실험적으로 쉽게 측정가능한 값이므로 앞으로 실험을 통해 본 논문에서 사용한 유도결합 플라즈마의 모델 및 수치해석 기법의 타당성을 검증하고자 한다.

참고문헌

1. W. Hittorf, *Wied. Ann. lii.* 473 (1884).
2. J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair, and J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol. A11*, 152 (1993).
3. J. Hopwood, *Plasma Sources Technol.* 1, 109 (1992).
4. P. L. G. Ventzek, R. J. Hoekstra, and M. J. Kushner, *J. Vac. Sci. Technol. B12*(1), 461 (1994).
5. A. C. Ugural, S. K. Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity", *Elsevier North Holland, Inc.* 390 (1981).
6. A. D. Richards, B. E. Thompson, and H. H. Sawin, *Appl. Phys. Lett.* 50(9), 492 (1987).
7. D. Rapp, P. E. Golden, *J. Chemical Physics, Vol.43*, No.5, 1464 (1965).
8. E. A. McDaniel, "Collision Phenomena in Ionized Gases, Wiley, New York, (1964).
9. G. R. Misium, A. J. Lichtenberg, and M. A. Lieberman, *J. Vac. Sci. Technol. A7*(3), 1007 (1989).
10. "ECR용 최적 마그네트 개발연구", 과기처 첨단 요소 과제 보고서 1992. 12. 한국전기연구소.
11. D. B. Montgomery, R. J. Weggel, "Solenoid Magnet Design", Robert Krieger Publishing Co., Huntington, New York, (1980).
12. "Metal Handbook 8-th edition", Vol.I, American Society for Metals.
13. V. A. Godyak, R. B. Piejak and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* 3, 169 (1994).
14. T. Fukasawa, T. Nouda, A. Nakamura, H. Shindo, and Y. Hornke, *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 32*, 6076 (1993).