

## 헬리칼 공명 플라즈마에서 축 방향의 외부 자장이 기판상의 플라즈마 밀도에 미치는 영향

김태현 · 태홍식 · 이용현 · 이호준\*\* · 이정해\* · 최경철

경북대학교 공과대학 전자전기공학부  
\*홍익대학교 공과대학 전자전기공학부  
\*\*위덕대학교 공과대학 전기공학과  
\*\*\*현대전자 산업주식회사  
(1999년 1월 22일 접수)

## Effects of axial external magnetic fields on plasma density on substrate in helical resonator plasma source

T. H. Kim, H. S. Tae, Y. H. Lee, J. H. Lee\*, H. J. Lee\*\* and K. C. Choi\*\*\*

*School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University*

*\*School of Electronic and Electrical Engineering, Hong-ik University*

*\*\*Department of Electrical Engineering, Uiduk University*

*\*\*\*Hyundai Electronics Industries Co., Ltd.*

(Received January 22, 1999)

**요 약** - 외부자장이 인가된 헬리칼 공명 플라즈마에서 플라즈마의 밀도의 축 방향 분포를 랑뮤어 프로브를 이용하여 측정하였다. 입사전력은 200 W로 고정하였고 압력은 0.4 mTorr에서 100 mTorr까지 변화하였다. 헬리칼 공명 플라즈마에 인가된 자장의 구조는 세 가지로 나누어진다. 즉 균일한 자장과 공정실의 기판을 중심으로 기판의 위쪽으로 기울기를 가지는 자장 그리고 공정실 방향 기울기를 가지는 자장으로 선택되었다. 세 종류의 자장구조에서 공정실 방향의 기울기를 가진 자장구조에서 가장 높은 플라즈마 밀도의 향상을 보였다. 헬리칼 공명 플라즈마의 플라즈마 밀도 분포는 전산모의 실험을 통해 구한 전자장의 분포와 일치하고 있으며 축 방향 자장이 인가될 때 전자장이 강한 반응실 영역은 플라즈마 분포에 큰 변화가 없으나 전자장의 영향이 작은 공정실 영역의 플라즈마 밀도는 크게 개선되었다. 인가된 자장은 플라즈마의 반경방향 균일도에 대한 영향을 피하기 위해 100 G이하의 약한 자기장에서 실험하였다.

**Abstract** - The axial distributions of plasma density in a helical resonator plasma with the external magnetic field have been measured using Langmuir probes. Net RF power is set to 200 W and chamber pressure is varied from 0.4 mTorr to 100 mTorr. There are three kinds of external magnetic field structure applied on the helical resonator plasma. One is a uniform magnetic field, the second is a positive gradient magnetic field and the third is a negative gradient magnetic field. In the three magnetic field structures, the negative gradient magnetic field is found to show the highest increase in plasma density on the substrate compared with other magnetic structures. Plasma density profile in helical resonator is well consistent with electromagnetic field pattern obtained by computer simulation. It is also found that axial magnetic fields do not affect plasma density distribution in the plasma reactor region, but induce the increase of plasma density in the process chamber region. In order to avoid the nonuniformity of radial density profile, weak magnetic fields under 100 G are applied.

### 1. 서 론

256 M급 또는 1 G급 초고집적 메모리 소자에 필요한

식각 공정은 높은 식각 속도, 종횡축 간의 비율에 따른 식각 속도차의 최소화 및 엄격한 임계치수 제어, 높은 선택도 등이 요구된다. 이러한 요구를 만족시키기 위해

서는 저압에서 안정된 플라즈마의 발생이 유지되어야 하며 압력이 내려감에 따라 플라즈마 밀도가 감소하므로 이를 보상할 수 있는 고효율의 플라즈마 발생이 필요하다. 또한 공정시 기판으로 입사되는 이온에 의한 조사 손상을 피하기 위해 기판으로 입사되는 이온에너지를 플라즈마 발생과 무관하게 독립적으로 조절할 수 있어야 한다. 이러한 요구를 만족시키는 플라즈마 소스로서 전자 사이클로트론 공명 플라즈마, 헬리콘 플라즈마, 유도 결합 플라즈마 등이 제안되었으며 최근까지 깊이 연구가 되어왔다. 그러나 위에서 언급한 플라즈마 발생 장치들은 고밀도의 플라즈마 발생을 위해 고가의 마이크로파 전력 발생기 혹은 공명 조건을 위한 강한 자기장 발생장치 등이 요구되거나 저압에서 불안정한 임피던스 정합 등 해결되지 않은 여러 문제점이 있다.

헬리칼 공명 플라즈마(Helical Resonator Plasma)[1]는 고밀도 플라즈마 소스로서 갖추어야 할 조건을 만족하고 플라즈마 발생을 위해 강한 자기장이 필요 없으며 비교적 저렴한 RF전력을 사용하며 저압에서 임피던스의 정합특성[2]이 우수하여 기존의 여러 플라즈마 소스보다 공정 효율에서 우위를 점할 수 있는 소스라 예상된다. 헬리칼 공명 플라즈마는 원칙적으로 RF 급전점의 위치를 변화시켜 플라즈마 부하의 임피던스를 조절함으로써 정합회로없이 최대전력을 전달할 수 있으며 저압에서 플라즈마의 점화가 용이하다. 그러나 헬리칼 공명 플라즈마는 하드웨어적 구조상 플라즈마가 발생하는 반응실과 공정이 이루어지는 공정실이 분리되어 있어 반응실에서 생성된 고밀도의 플라즈마가 기판이 존재하는 공정실까지 전달되는 과정에서 공정실 영역의 플라즈마의 밀도가 반응실에 비해 상당히 낮아지는 현상을 보이고 있다. 이는 양극성 확산을 통한 플라즈마 수송 과정에서 반응실 및 공정실 벽쪽으로의 확산에 의한 손실 및 재결합 손실이 가장 큰 원인으로 생각되며 효율적인 공정을 위해 개선되어야 할 사항으로 인식되었다.

본 연구는 플라즈마 수송 과정에서 원하지 않는 플라즈마의 손실을 줄이고 반응실에서 플라즈마밀도의 개선을 위해 축 방향의 약한 자기장을 제안하여 다양한 자기장의 구조에 따른 플라즈마 밀도의 분포를 조사하였고 가장 효율적인 자기장의 구조를 밝히고자 한다. 축 방향의 외부 정자기장은 플라즈마 발생에 직접 참여하거나 자기장의 에너지를 플라즈마로 전달하지는 않지만 자기장의 수직방향으로의 확산[3]을  $1/(1+\omega_c^2/\gamma_m^2)$  비율로 제한하여 반경방향으로 확산되는 플라즈마의 손실을 줄이

는 역할을 한다. 강한 자기장은 플라즈마를 강하게 구속시키지만 공정에 있어 중요한 요인이 되는 반경방향의 균일도를 확보하는데 문제점으로 작용하기 때문에 본 실험에서는 100 G 이하의 약한 자기장을 중심으로 실험하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 안테나의 전류 및 전압분포

헬리칼 공명 플라즈마는 라디오 주파수(RF) 전류에 의해 구동되는 헬리칼 안테나로부터 복사되는 전자기파 에너지를 기체가 흡수해서 플라즈마가 발생하는 장치이다. 이때 헬리칼 안테나는 헬릭스 형태로 감겨 있으며 한 쪽단은 단락 또는 개방되어 있고, 다른 쪽 단은 개방 또는 단락 될 수 있다. 개방과 단락은 안테나의 총 길이와 여기 주파수 파장과의 관계에 의해서 결정된다. 안테나 전체의 길이는 여기 주파수 파장을  $\lambda/4$  했을 때 공명(resonance) 현상이 발생하기 위해서는  $\lambda/4$ 의 정수배가 되게 선택되어야 한다.

헬리칼 안테나는 RF 파가 전달되는 일종의 전송선(transmission line)으로 볼 수 있으며 안테나상의 전압과 전류가 선로이론(transmission line theory)에 의해 예측이 가능하다. 안테나상의 급전점에서 입사된 RF 파는 헬릭스를 따라 진행하다가 안테나 양단에서 완전 반사하게 되고 반사되는 파와 입사되는 파의 합성으로 헬릭스상에 RF 정재파가 생성된다. RF 정재파는 전압정재파와 전류 정재파로 구성되어 있으며 다음과 같이 표현된다[4].

$$V(z) = -2jV^+ \sin \beta z \tag{1}$$

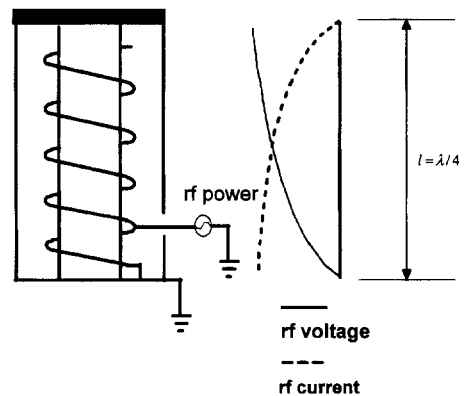


Fig. 1. Structure of a quarter wave antenna and standing waves on a helical antenna.

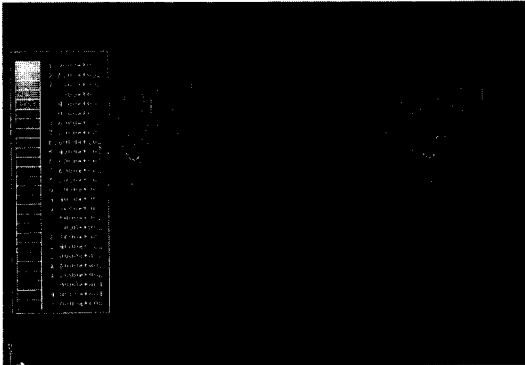


Fig. 2. Equipotential line of a helical antenna.

$$I(z) = 2 \frac{V^+}{Z_0} \cos \beta z \tag{2}$$

여기서  $V^+(z)$ 입사된 전압파,  $I^+(z)$ 은 입사된 전류파,  $\beta$ 는 전파정수이고  $Z_0$ 는 헬릭스의 특성임피던스이다. 특정 여기 주파수에서 위 식을 만족하는 선로가 존재할 때 선로는 공명상태가 되어 선로 상에 큰 전압 전류의 정재파가 형성된다. Fig. 1는 안테나의 하단부가 단락되고 상단부가 개방되었을 때 헬리칼 공명 플라즈마의 안테나 상에 형성된 전류 정재파와 전압 정재파의 패턴을 나타낸 것이다. 이 때 Fig. 2와 Fig. 3은 실험에 사용된 안테나 구조에서 정재파 전압 및 전류에 의해 유도된 전자장의 등전위면과 등가우스면을 Maxwell2D Simulator을 이용하여 전산모사한 것이다.

Fig. 2는 플라즈마가 없는 자유 공간에서 안테나상의 정재파 전압을 가정하고 전산모사된 등전위면이다. 안테나 내부 영역에서 축 방향의 전위 기울기는 비교적 균일하여 축 방향 전계에 의한 전자의 가열은 비교적

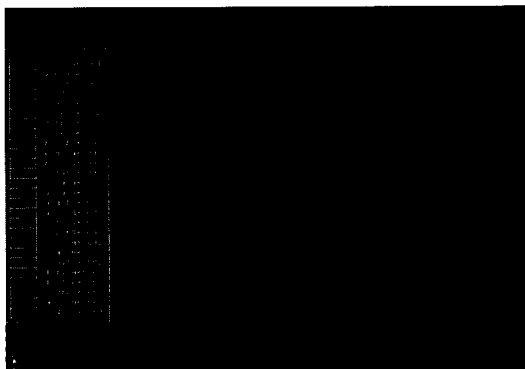


Fig. 3. Equigaussian line of helical antenna.

균일할 것으로 예측된다. Fig. 3은 동일한 조건에서 안테나에 정재파 전류를 가정하고 전산모사된 전류에 의해 유도된 자장의 등가우스면이다. 그림에서 알 수 있듯이 안테나의 중심에서 조금 벗어난 하단부 쪽에서 자장이 가장 강하며 이 자장이 유도하는 원주방향 전계에 의해 전자의 가열이 이 영역에서 가장 활발할 것으로 예측된다. 헬리칼 공명 플라즈마는 저전력 운전시 축 방향 전계에 의한 플라즈마의 발생이 지배적인 커패시티브 모드와 대전력 운전시 반경방향 전계에 의한 플라즈마 발생이 지배적인 인덕티브 모드가 존재함이라고 보고된 바 있다[5]. 실험을 통해 확인한 바 저전력 운전시 튜브내의 플라즈마는 축 방향으로 균일하게 발생되고 대전력 운전시 안테나의 중심에서 안테나 접지단 쪽으로 조금 벗어나 토로이드 형태의 국한된 플라즈마 발생이 관찰된다.

2.2. 자계가 인가된 플라즈마

자계내에 하전입자가 놓이게 되면 자계에 수직되게 선회운동을 하게 되며 자계의 수직방향으로의 운동이 제약을 받게 된다. 특히 전하량 대 질량비가 큰 전자는 사이클로트론 주파수  $\left(\omega_c = \frac{qB}{m}\right)$ 와 선회반경인 라머반경  $\left(r_L = \frac{mv_{\perp}}{qB}\right)$ 을 가지며 자계의 강한구속을 받게 된다. 등방적이던 플라즈마의 확산이 자기장이 존재함으로써 전자의 강한구속에 의해 그 확산속도가  $1/(1+\omega_c^2/\gamma_m^2)$ 의 비율로 줄어든다. 결국 자계에 수직된 방향의 확산계수는 다음과 같이 수정된다.

$$D_{\perp} = \frac{KT_e}{m \gamma_m} \left( \frac{1}{1 + \omega_c^2/\gamma_m^2} \right) \tag{3}$$

여기서  $K$ 는 플랑크상수,  $T_e$ 는 전자온도,  $m$ 은 입자의 질량,  $\gamma_m$ 은 총돌주파수,  $\omega_c$ 은 선회주파수를 나타낸다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1. 장치의 구성

실험에 사용된 장치의 개념도가 Fig. 4에 있다. 본 시스템은 크게 배기계통, 가스공급계통, 플라즈마 반응실, 확산챔버, RF전력계통, 축 방향 자기장 발생장치로 구성되어 있다. 배기는 기계식 로터리 펌프와 터보 분자 펌프로써 이루어지며 진공도는 피라니게이지와 콜드캐

소드게이지를 이용하여 챔버내부의 압력을 측정하게 되어 있다. 플라즈마 반응실은 방전이 일어나는 방전튜브와 가열코일, 전자장을 차폐(shielding)하는 외부 도체로 구성되어 있다. 방전 튜브는 열특성이 좋으며 전자기파를 잘 통과시키는 석영관을 선택하였으며 내경이 110 mm, 두께 3 mm, 높이 300 mm인 원통형 구조를 이루고 있다. 가열코일은 헬릭스 형태로 감겨있으며, 고주파 전류의 표피효과(skin effect)를 고려하여 표면적이 넓은 1/4 inch 동판을 사용하여 고주파 저항 손실을 줄이고자 하였다. 코일 간격을 10 mm로 균일하게 감았고 직경은 160 mm이며 총 11회를 감아 안테나를 구성했다. 코일의 하단부는 단락시키고 상단부는 개방시켰으며 코일내부에 냉각수를 흘려 장시간 운전에 의한 과도한 코일의 온도 상승을 막았다. 전자를 차폐하는 외부 차폐는 자계가 통과 할 수 있도록 구리(copper)를 사용하여 플라즈마가 자화되는데 방해가 되지 않게 하였다. 가스는 순도 99.999%의 아르곤(Ar)을 사용하였고 공정실이 되는 확산 챔버는 자계가 잘 통과할 수 있는 동판으로 제작되었다. RF전력계통은 RF generator, matching network, 50 Ω 동축케이블(12 feet)로 구성되어 있다. RF generator의 구동 주파수는 13.56 MHz이고 50 Ω의 내부 임피던스를 가지고 있다. 정합회로는 본질적으로 필요 없으나 챔버 내부의 압력 변화 및 자기장인가에 따른 플라즈마 부하의 변화에 상관없이 안정된 전력전달을 위해 사용하였다. 정합회로에서 안테나로 RF전력이 입사되는 급전점은 표면적이 넓은 동판을 연결하여 급전하였고 급전

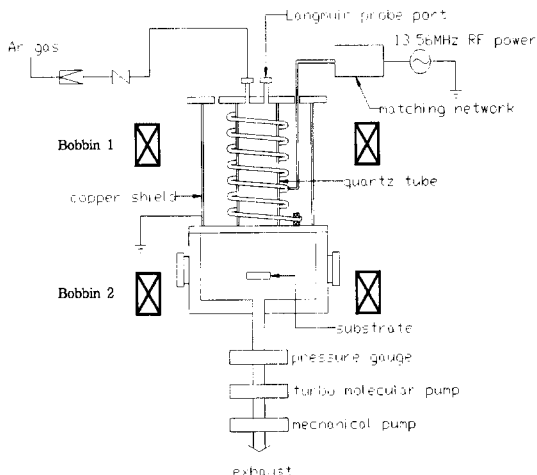


Fig. 4. Schematic diagram of the helical resonator plasma system.

동판과 안테나의 연결 시 접촉면의 청결에 유의하였으며 동판과 코일 면 사이에 공간이 생기지 않도록 하여 최대한 접촉면적을 넓게 하여 저항 손실을 줄이고자 했다. 자화된 플라즈마를 진단하기 위해 이중탐침[6]을 사용하였으며 탐침의 재질은 이온 폭격에 의한 2차전자방출계수가 작고 열에 강한 텅스텐(W)을 사용하였다. 실험중 탐침의 오염에 의한 신호의 왜곡을 줄이기 위해 전자 전류를 허용하여 탐침을 세정하였다.

### 3.2. 자기장의 구조

축 방향 자기장을 생성하는 보빈은 직경 1.3 mm의 동선으로 1500 회를 감았으며 공냉식으로 되어있고 내경 500 mm, 외경 550 mm, 높이 90 mm이다. 한 쪽 보빈은 공정실을 주위로 하여 설치하였고 다른 한 쪽은 공

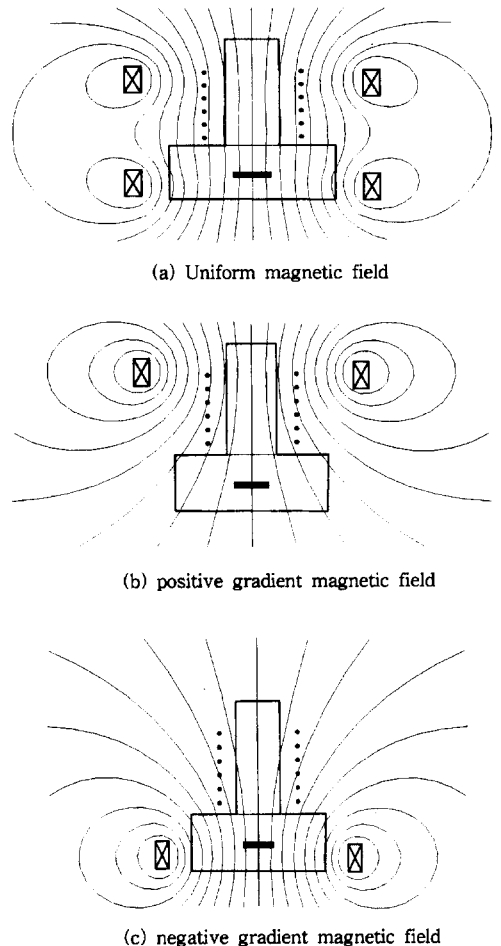


Fig. 5. Structure of axial magnetic fields.

정실보다 250 mm 높게 안테나 주위에 위치하도록 하였다. 보빈을 통해 생성되는 자계의 구조는 전류를 인가하는 방법에 따라 3가지로 나뉘어 진다. Fig. 5(a)은 보빈 사이의 간격과 반경이 같은 Helmholtz 코일 형태로서 균일한 자기장을 생성하는 구조를 가지고 있다. 이 구조

에서 자기장이 20, 50, 100 G일 때 축 방향 자기장 분포가 Fig. 6(a)에 나타나 있다. 하전입자들의 충돌을 무시할 때 하전입자는 자속을 따라 선회운동을 하면서 균일하게 공정실로 전달된다. 자기장의 기울기가 없기 때문에 자기장의 수직방향으로의 확산계수가 위치에 관계없이 일정하다. Fig. 5(b)는 축 방향으로 자기장의 기울기를 가지는 구조로서 자기장의 기울기가 위쪽을 향하는 +z방향이고  $B_{max}$ 가 반응실 영역에 존재한다. 이 구조에서 자기장이  $B_{max}$ 가 20, 50, 100 G일 때 축 방향 자기장 분포가 Fig. 6(b)에 나타나 있다. 자기장이 발산하는 구조이므로 하전입자 또한 자기장을 따라 선회운동을 하면서 발산하며 공정실로 갈수록 자기장이 약해지므로 자기장에 수직된 방향의 확산계수가 커진다. Fig. 5(c)는 축 방향으로 자기장의 기울기를 가지며 자기장의 기울기가 아래쪽으로 향하는 -z방향이고  $B_{max}$ 가 공정실 영역에 존재한다. 이 구조에서 자기장이  $B_{max}$ 가 20, 50, 100 G일 때 축 방향 자기장 분포가 Fig. 6(c)에 나타나 있다. 자속은 공정실로 집중되며 하전입자 역시 선회운동을 하면서 공정실로 집중된다. 공정실쪽에 가까울수록 자기장이 강해지므로 자기장의 수직 방향의 확산계수는 작아지면서 확산이 제한된다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7, 8, 9, 10은 축 방향 자기장이 인가되고 그 구조

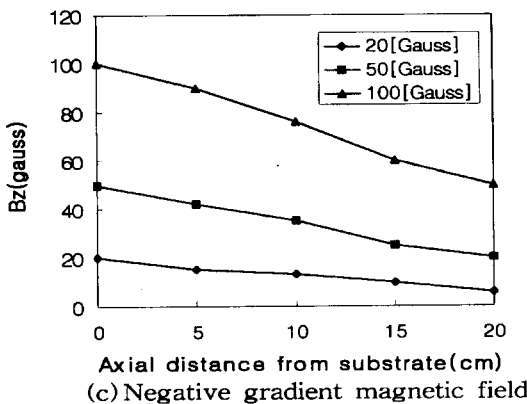
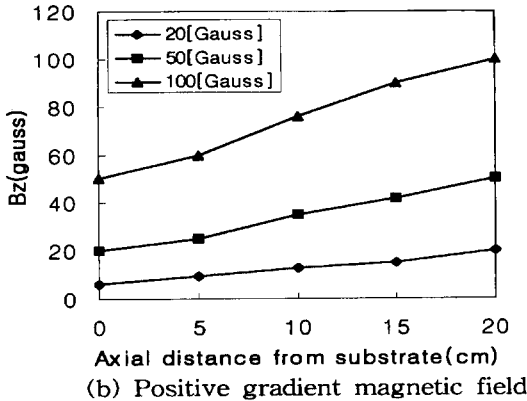
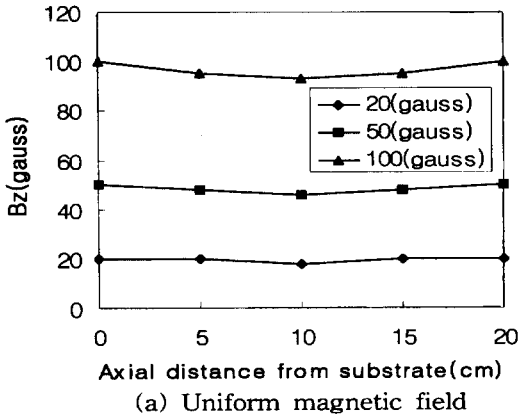


Fig. 6. Axial distributions of magnetic field.

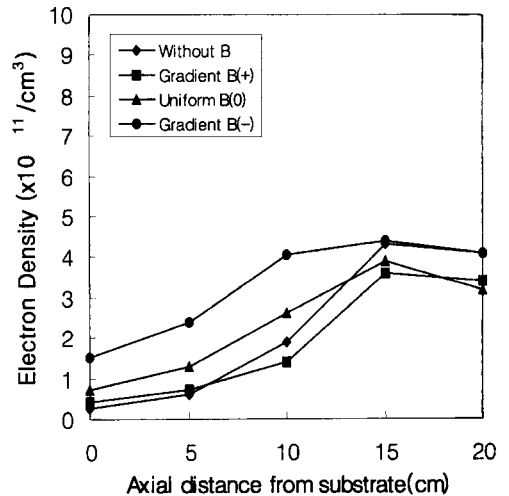


Fig. 7. Axial distribution of plasma density (pressure : 0.4 mTorr,  $B_{max}$  : 100 gauss,  $r=0$  cm, RF power : 200 W).

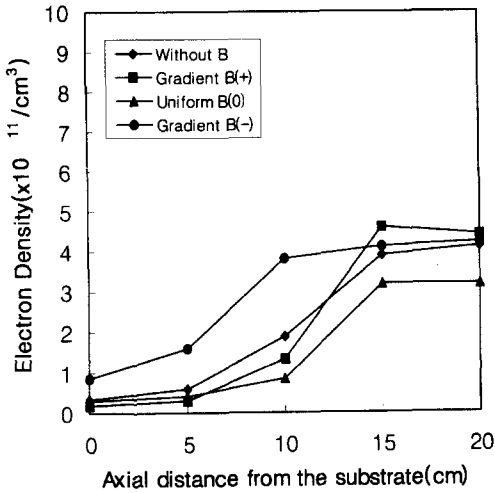


Fig. 8. Axial distribution of plasma density (pressure : 1 mTorr,  $B_{max}$  : 100 gauss,  $r = 0$  cm, RF power : 200 W).

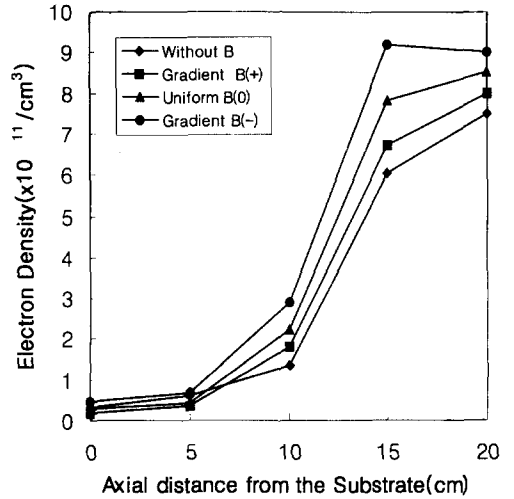


Fig. 10. Axial distribution of plasma density (pressure : 100 mTorr,  $B_{max}$  : 100 gauss,  $r = 0$  cm, RF power : 200 W).

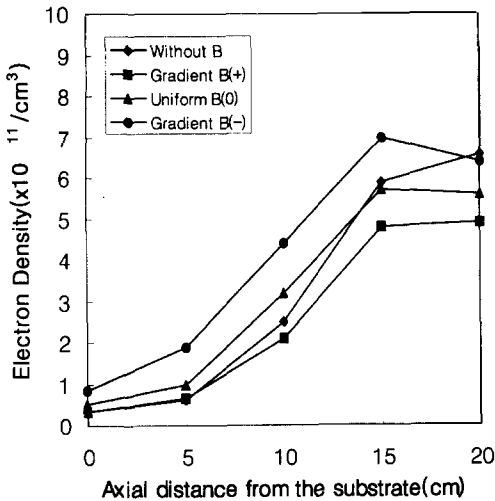


Fig. 9. Axial distribution of plasma density (pressure : 10 mTorr,  $B_{max}$  : 100 gauss,  $r = 0$  cm, RF power : 200 W).

에 따라 플라즈마 밀도의 축 방향 분포가 압력에 따라 변화하는 양상을 보여 주고 있다. 공정실 내에서 기판의 위치( $z = 0$  cm)를 기준으로  $z = 10$  cm와  $z = 20$  cm 사이가 헬리칼 안테나가 존재하는 반응실 영역이다. 그림에서 알 수 있듯이 외부 자기장이 없을 경우 반응실과 공정실의 플라즈마 밀도는 크게 차이가 나고 있다. 강한 전자장이 존재하는 안테나의 중심( $z = 15$  cm)에서 플라즈마 밀도가 가장 높고 상대적으로 전자장이 약한 안테나 양단( $z = 10, 20$  cm)에서는 조금씩 플라즈마 밀도가

낮아지며 전자장이 가장 약한 공정실 영역은 가장 낮은 플라즈마 밀도의 분포를 보여주고 있다. 공정실 내부는 전자장의 영향이 약하므로 이온화가 활발히 일어나지 않은 영역이며 반응실에서 강한 전자장에 의해 생성된 고밀도의 플라즈마가 양극성 확산을 통해 전달되어 공정실 내부의 플라즈마를 형성하고 하게 된다. 전자장이 강한 안테나 내부의 반응실 영역에 외부 자기장이 인가될 때 플라즈마의 밀도 분포의 변화에 비해 전자장이 상대적으로 약한 공정실 영역에서는 외부 자기장을 인가함으로써 플라즈마의 밀도가 상당히 개선됨을 보여주고 있다. 실험이 행하여진 모든 압력에서 일관되게 공정실의 플라즈마 밀도는 공정실 방향의 자기장 기울기를 가지는 자기장 구조에서 가장 높게 나타나고 있으며 압력이 낮을수록 외부 자기장의 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 반응실을 빠져 나온 플라즈마는 공정실을 향해 등방적으로 확산해 갈 때 축 방향 자기장이 존재하게 되면 자계에 수직된 방향으로의 확산이  $1/(1+\omega_e^2/\omega_m^2)$ 의 비율로 제한된다. 공정실 방향으로의 기울기를 가지는 자기장 구조에서는 반응실을 빠져나온 하전입자들은 공정실에 가까워질 수록 강한 자기장에 의해 사이클로트론 주파수가 커지게 된다. 이 때 자기장에 수평이 되는 속도성분( $v_{\parallel}$ )은 작아지게 되고 자계의 수직운동성분( $v_{\perp}$ )은 커지게 된다. 이러한 자기장 구조에서 기판부근에는  $v_{\parallel}$ 가 최소가 되어 공정실내에 하전입자의 잔류 시간이 길어지게 된다. 즉 강한 자기장 쪽으로 진행하는

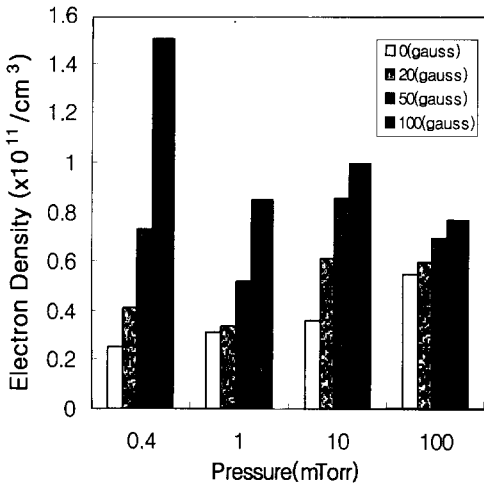


Fig. 11. Variation of plasma density as a function of magnetic field (RF power : 200 W,  $r=0$  cm,  $z=0$  cm).

전자는  $-\mu\nabla B$ 의 힘을 받게 되어 공정실로의 진행이 점차 느려지게 된다. 공정실에서 하전입자의 진행 속도가 줄어들고 잔류시간이 길어지게 되어 결과적으로 플라즈마 밀도가 상승하게 되는 것으로 추정된다. 결국 공정실 방향으로 기울기를 가지는 자기장 구조에서는 자기장에 의해 반경 방향의 손실이 줄어들 뿐만 아니라 공정실 내에서  $-\mu\nabla B$ 의 힘에 의해 하전입자의 잔류시간이 길어져 균일한 자기장의 경우 보다 높은 플라즈마 밀도를 나타낸 것으로 생각된다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 100 mTorr 영역에서는 자기장이 인가되면 플라즈마 밀도는 공정실 중심에서 약 1.4배 정도의 플라즈마 밀도의 증가를 보이고 있어 그 증가의 양상은 크게 나타나지 않는다. 압력이 비교적 높기 때문에 전자와 중성입자들과의 빈번한 충돌로 인하여 플라즈마의 확산이 제한을 받게 되고 이 때문에 반응실과 공정실의 플라즈마 밀도의 차이가 크게 나타나며 전자의 사이클로트론운동이 제한되어 자기장의 영향이 작은 것으로 생각된다. 비교적 압력이 낮은 10 mTorr, 1 mTorr, 0.4 mTorr 압력범위에서 자체의 구조와 세기에 따른 플라즈마 밀도의 분포는 각각 다른 양상을 가지지만 대체적으로 비슷한 분포를 보이고 있다. 공통적으로 기울기가 공정실을 향하는 자기장 구조일 때 공정실 내에 가장 높은 플라즈마의 밀도를 보이고 있다. 이러한 구조에서  $B_{max}=100$  G의 자기장을 인가했을 때 공정실의 압력이 10 mTorr일 때 2.7배, 1 mTorr일 때 3.3배, 0.4 mTorr일 때 6.3배의 플라즈마 밀도

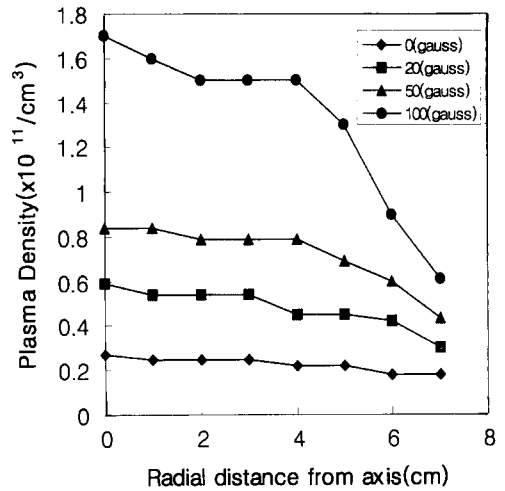


Fig. 12. Radial distribution of plasma density (pressure : 0.4 mTorr,  $z=0$  cm, RF power : 200 W).

도의 향상을 보여주고 있다. Fig. 12는 공정실 방향의 기울기를 가지는 자기장 구조에서 공정실의 반경방향 플라즈마 밀도 분포를 보여준다. 자기장의 세기가 커질수록 플라즈마 균일도가 나빠지는 것을 알 수 있다. 이러한 외부 자기장의 인가에 따른 균일도에 문제는 향후 더욱 연구가 되어야 될 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

헬리칼 공명 플라즈마에서 플라즈마 반응실에 비해 상대적으로 낮은 공정실내의 플라즈마 밀도를 개선하기 위해 축 방향 자기장 구조를 설계하고 100 G 이하의 약한 자기장을 인가하여 다음과 같은 결론을 얻는다.

- 1) 플라즈마 밀도의 분포는 헬리칼 안테나의 전자장에 의해 결정이 되고 전자장이 약한 공정실 내부의 플라즈마 밀도는 반응실에서 확산해온 플라즈마에 의해 조절될 수 있다.
- 2) 외부에 인가된 축 방향의 자기장은 반응실 영역보다 공정실 영역의 플라즈마 밀도 분포에 상대적으로 큰 영향을 준다.
- 3) 실험이 이루어진 압력영역에서 공정실의 플라즈마 밀도의 상승을 위한 축 방향 자기장 구조는 자기장의 기울기를 가지고 그 기울기의 방향이 공정실 방향인 자기장 구조가 가장 효율적이며 압력이 낮을수록 공정실의 플라즈마 밀도의 개선에 유리하다.

### 감사의 글

이 논문은 1997년도 경북대학교 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- [1] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, and D. L. Flamm, Univ. of California, Berkeley, Memo. UCB/ERL M 90/10 (1990).
- [2] K. Niazi, A. J. Lichtenberg, M. A. Liberman and D. L. Flamm, *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 482 (1994).
- [3] Francis F. Chen, Plenum, Introduction to plasma physics and controlled fusion 2nd ed. (Plenum Press, New York, 1984) chap.5.
- [4] Simon Ramo, John R. Whinnery, Theodore Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics 3rd ed. (John Wiley & Sons, Inc, 1996) chap.5.
- [5] P. Bletzinger, *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 2975-2979 (1994).
- [6] I. H. Hutchinson, Principles of Plasma Diagnostics (University Press, Cambridge, 1987) chap.3.