

# ECR 용 최적 마그네트에 관한 연구

\*김윤택<sup>0</sup>, \*김용주, \*\*김교순, \*\*이용직, \*\*손명호

\* 한국전기연구소 전력기기연구소 \*\* (주)스와이크 부설연구소

## A Study on the Optimal Magnet for ECR

\*Y.T.Kim<sup>0</sup>, \*Y.J.Kim, \*\*K.S.Kim, \*\*Y.J.Lee, \*\*H.H.Son

\* Power Apparatus Lab KERI \*\* SWIECO Korea, LTD.

### ABSTRACT

ECR(Electron Cyclotron Resonance) occurs at  $\omega_e = \omega$ ,  $\omega_e$ :electron cyclotron frequency,  $\omega$ :electromagnetic wave frequency. ECR system have several merit, 1) power transefer efficiency 2) low neutral gas pressure( below 1 mTorr) 3) high plasma density( $10^{12}$  cm<sup>-3</sup>). It is applicated variously in the field of semiconductor and new materials as the manufacturing equipment.

Magnetic field in ECR system construct resonance layer ( $\omega = 2.45\text{GHz}$ ,  $B_z = 875$  Gauss) and control plasma. Plasma is almost generated at resonance layer. If the distance between substrate and reonsnce layer is short, uniformity of plasma is related with profile of resonance layer. Plasma have the property "Cold in Field", so directonality of magnetic field is one of the control factors of anisotropic etching.

In this study, we calculate B field and flux line distribution, optimize geometry and submagnet current and improve of magnetic field directionality (99.9%) near substrate.

For the purpose of calculation, vector potential  $A(r, z)$  and magnetic field  $B(r, z)$ , green function and numerical integration is used. Object function for submagnet optimization is magnetic field directionality on the substrate and Powell method is used as optimization skim.

### 1. 서론

ECR(Electron Cyclotron Resonance)은 플라즈마 내에 존재하는 전자의 자장에 의한 회전주파수( $\omega_e$ )와 전원으로 가해지는 전자파의 주파수( $\omega$ )와 일치할 때 나타나는 현상으로 플라즈마 내부로의 전자파 에너지 전달이 용이하고 낮은 증성기체 압력(1 mTorr)하에서 고밀도( $10^{12}$  cm<sup>-3</sup>)의 플라즈마 형성이 용이하여 반도체 및 신소재 제조장비의 플라즈마원으로써 그 응용분야가 다양하게 연구되고 있다. ECR에서의 자장 역할은 공진층( $\omega = 2.45\text{GHz}$ ,  $B_z = 875$  Gauss) 형성 및 플라즈마 제어이다. 공진층은 주로 플라즈마를 발생시키며 시료와 공진층의 거리가 짧을수록 공진층의 형상은 플라즈마의 균일성에 영향을 많이 미친다. 또한 플라즈마는 flux line을 따라 유직이는 성질이 있으므로 공진층과 시료 사이의 flux line 형상은 균일성과 수직성에 영향을 미친다. (1)

본 연구에서는 공진층 형성을 주마그네트와 시료 부근의 flux line 제어를 부마그네트로 구성된 마그네트 시스템을 대상으로 자장 분포 및 flux line 형상을 구하였고 부마그네트의 크기 및 전류를 최적화하여 시료 근처에서의 자장 수직

성을 99.9% 까지 향상 시켰다.

자장 해석 방법은 회전대칭모델의 Green 함수를 이용하여 벡터포텐셜  $A(r, z)$ 와  $B(r, z)$ 을 수치적분에 의해 구하였고, 부마그네트의 최적화를 위해서는 시료 표면에서의 자장 수직성을 목적함수로 취하였고 해석기법으로 Powell 방법을 사용하였다.

### 2. 마그네트 시스템

#### 2.1 마그네트 기본 특성

솔레노이드형 마그네트의 기하학적 구조는 그림 2-1과 같다. 마그네트 중심의 자장  $H_0$ 는 식 (2-1, 2)와 같이 나타낼수 있다.

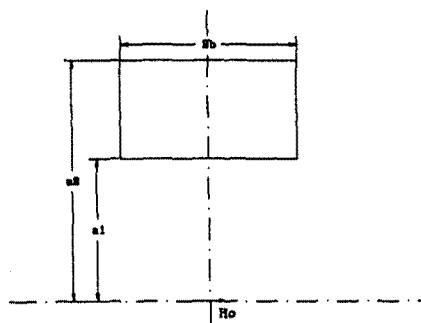


그림 2-1. 솔레노이드형 마그네트

$$H_0 = \lambda J a_1 \frac{4\pi\beta}{10} F(\alpha, \beta) \quad (2-1)$$

$$F(\alpha, \beta) = \sinh^{-1} \frac{\alpha}{\beta} - \sinh^{-1} \frac{1}{\beta}, \text{ Field-factor}$$

$$H_0 = G(\alpha, \beta) \left( \frac{W\lambda}{P\alpha} \right)^{1/2} \quad (2-2)$$

$$G(\alpha, \beta) = \frac{1}{5} \left( \frac{2\pi\beta}{\alpha\beta} \right)^{1/2} \left( \sinh^{-1} \frac{\alpha}{\beta} - \sinh^{-1} \frac{1}{\beta} \right), \text{ G-factor}$$

$\lambda$  : space factor  
 $J$  : 전류 [A]

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} \quad \beta = \frac{b}{a_1}$$

- W : 소요전력 [W]
- P : 비저항 [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
- a<sub>1</sub> : 마그네트내경 [cm]
- a<sub>2</sub> : 마그네트 외경 [cm]
- b : 마그네트 길이 /2 [cm]

식 (2-1)에서 알수 있듯이 자장은 전류에 비례하므로 자장의 크기를 2배로 증가시키려면 전류는 2배 증가하고 마그네트의 소모 전력은 4배로 증가한다.

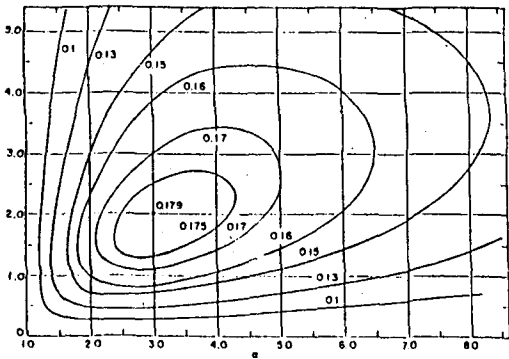


그림 2-2  $\alpha, \beta$  에 따른 "G-factor"의 변화

식 (2-2)의 G-factor는 그림 2-2에서의 값이  $\alpha=3, \beta=2$ 에서 최대값 (0.179)를 가지므로 최소의 전력으로 원하는 자장을 얻을수 있으나 마그네트의 부피가 커지고 불필요한 영역에 고자장이 발생하며 내부에서 발생된 열의 효과적인 제거가 어려워 적당하지 않다.

본 연구에서는 주 마그네트를 2개의 마그네트로 구성하여  $\alpha=2, \beta=1, G=0.16$  부근에 해당하게 하여 자장변환효율이 10% 정도 낮으나 마그네트의 부피는 약 5분의 1로 줄어들어 보다 적당하다고 사료된다.

마그네트의 열 특성은 온도상승에 따른 도체의 비저항 상승 (0.41%)을 무시한 경우 마그네트의 온도 상승과 소모전력이 비례관계에 있으나 비저항의 온도 특성을 고려하면 마그네트의 온도상승에 따른 비저항 증가로 인해 마그네트의 소모전력이 증가하여

온도 상승이 비례관계 이상으로 상승하게 된다. 마그네트의 열 특성을 간략화하면 식 (2-3)과 같은 관계식이 유도된다.

$$\Delta T = \frac{W}{1 - C \cdot W} \quad (2-3)$$

- $\Delta T$  : 온도 상승분
- W : 소모전력
- C : 상수

공간상에 1000 gauss 이상의 고자장 형성에는  $3A/\text{mm}^2$  이상의 전류밀도가 요구되어 식 (2-3)과 같은 기하급수적인 온도 상승이 발생하므로 냉각에 특히 주의해야 한다. 또한 마그네트의 동작 온도 증가에 따라 마그네트의 소모전력이 증가하므로 고온에서코일간의 절연이 유지된다고 하더라도 마그네트의 자장 변환효율을 증가시키기 위해서는 효율적인 냉각에 의해 마그네트 동작온도를 낮추는 것이 중요하다.

## 2.2 마그네트 시스템 구성

마그네트 시스템은 주마그네트와 부마그네트로 구성된다. 주마그네트는 공진층 형성(875 Gauss)과 마이크로웨이브 투입부에 고자장(1000 Gauss)을 형성 하며 부마그네트는 시료

표면의 자장 수직도, 플라즈마 균일도 개선 및 플라즈마 밀도 작용을 한다. 그림 2-3은 개략적인 마그네트 시스템 구성

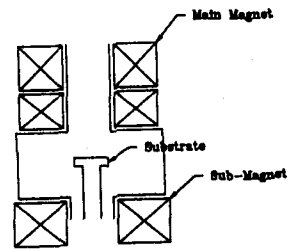


그림 2-3 마그네트 시스템 구성도

을 나타낸다. 주마그네트와 부마그네트의 크기, 전류는 각 3장과 4장에서 결정 하였다.

## 3. 자장 해석

솔레노이드형 마그네트를 수치해석 하는 방법으로는 유한요소법, 유한차분법등 여러방법이 있으나 본 장에서는 ECR용 마그네트의 해석을 위해 Biot and Savart 식을 이용한 Semi-Analytic 방법에 대해 기술하고자 한다. 특히 이방법은 유한요소법이나 유한차분법 등에서 무한 경계를 가지는 해석 모델에 적용할 때 발생하는 경계처리의 문제점이 없으며 정확한 계산이 요구되는 영역에 정밀한 계산이 용이하다. 또한 본 수치해석 기법은 기본적으로 field의 superposition 성질을 이용하고 있으므로 각 마그네트의 단위 전류에 대한 자장 분포를 구하여 기하학적인 변경없이 마그네트의 전류값만 변화시킬 때는 각 마그네트에 의한 자장에 전류를 곱하고 superposition를 취하여 특별한 계산없이 자장분포를 구할수 있다. ECR용 마그네트의 설계를 위해서는 각 코일의 전류에 의한 자장형상 및 마이크로웨이브 주파수가 2.45 [GHz] 일때의 공진층인 875[gauss]의 위치 변화를 구하는 것이 중요하므로 반복되는 여러 경우의 계산을 보다 효율적으로 할수 있다.

### 3.1 해석 모델

본연구에서는 솔레노이드형 마그네트를 해석모델로 하므로 회전대칭이고 마그네트의 전류는 원전류의 합으로 가정하였다. 여기서는 모델을 단순화 하기위하여 한개의 마그네트만을 고려하였으나 임의의 갯수의 마그네트의 해석도 마그네트의 해석결과와의 합에 의해 구해지므로 실제 마그네트 해석에 적용하는데는 제한이 없다.

개략적인 해석모델은 그림 3-1 과 같다.

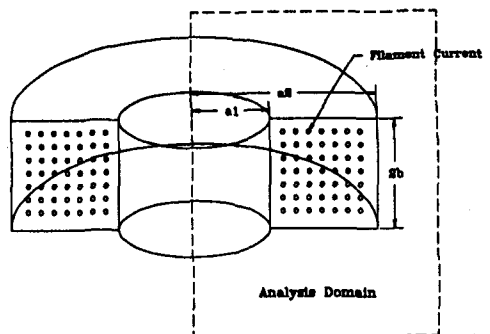


그림 3-1 솔레노이드형 마그네트의 해석적 모델

## 3.2 해석식

그림 3-1 을 모델로한 벡터포텐셜 A 은

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3-1)$$

$A_i$  :  $i$  번째 원전류에 의한 벡터포텐셜  
 $n$  : 원전류의 갯수

식 (3-1)과 같으므로 각 원전류에 의한 벡터포텐셜이 구해지면 이값들의 합으로부터 마그네트 전체에 의한 벡터포텐셜 및 자장을 구할 수 있다.

벡터포텐셜은 일반적으로 CGS 단위를 사용한 경우 식(3-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A(\mathbf{r}) = \frac{1}{C} \int \frac{J}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dv \quad (3-2)$$

한개의 원전류에 의한 벡터포텐셜은 식 (3-3)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} A\phi(r,z) &= \frac{I}{C} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho' d\rho' dz' d\phi' \frac{\cos(\phi') \delta(z') \delta(\rho'-a)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \\ &= \frac{4Ia}{C} \frac{1}{((\rho+a)^2+z^2)^{1/2}} \left[ \frac{2-k^2}{k^2} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{(1-k^2\cos^2(\alpha))^{1/2}} d\alpha \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{k^2} \int_0^{\pi/2} (1-k^2\cos^2(\alpha))^{1/2} d\alpha \right] \\ &= \frac{4Ia}{C} \frac{1}{((\rho+a)^2+z^2)^{1/2}} \left[ \frac{2-k^2}{k^2} K(k) - \frac{2}{k^2} E(k) \right] \quad (3-3) \end{aligned}$$

$K(k)$  : elliptic integral of the first kind.

$E(k)$  : elliptic integral of the first kind.

$$k^2 = \frac{4\rho a}{(\rho+a)^2+z^2}$$

자장  $B$ 은 벡터포텐셜의 Curl에 의해 구해지므로 Cylindrical Coordinate에서  $A_\rho=A_z=0$  조건을 적용하면 식 (3-4)가 유도 된다.

$$B_\rho = -\frac{\partial A\phi}{\partial z}, \quad B_\phi = 0, \quad B_z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A\phi}{\partial \rho} \quad (3-4)$$

이들 Special 함수의 계산은 polynomial 근사식(4)을 사용하였다.

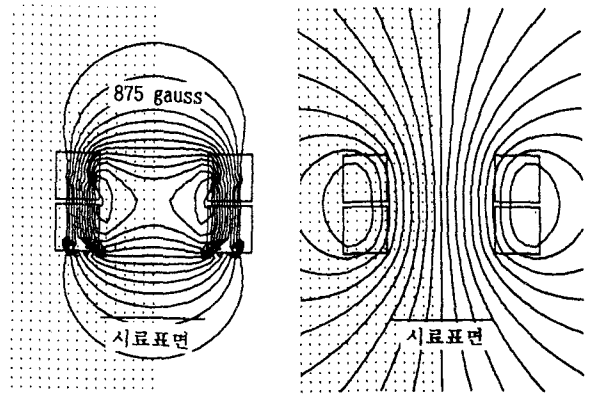
이와같이 구해진 벡터포텐셜  $A\phi$ 는 한개의 원전류에 의한 값이므로 각각의 원전류에 의한 벡터포텐셜을 구하여 합하면 마그네트 전체에 의한 벡터포텐셜을 구할 수 있다.

### 3.3 주마그네트

그림 3-2,3 에는 2 개의 마그네트(내경 230 mm, 외경 417 mm, 높이 98 mm, 전류 135 A, 55 turn, 5 layer)로 구성된 주마그네트에 대한 수치해석 결과로 각각 10 mm, 300 mm 의 간격일 때의 flux line 및 자장 분포를 나타내고 있다. 특히 그림 3-3은 mirror field 형태를 취하며 mirror ratio ( $B_{max}/B_{min}$ )가 2 이다.

### 4. 부마그네트의 최적화

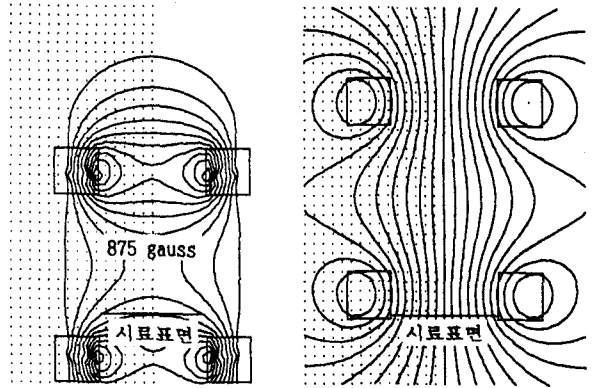
플라즈마는 자장을 따라 움직이는 성질이 있으므로 식자장 치에서 요구되는 비등방 식자성 향상을 위해서는 시료표면에서의 자장 수직성 개선이 한 방법이다. 자장 수직성 개선은 주로 시료 부근에 위치시키는 부마그네트에 의해 이루어지므로 부마그네트의 최적화는 비등방 식자성 향상에 중요한 요



a)  $B_z$ 의 분포

b) Flux line 분포

그림 3-2 마그네트에 의한 자장분포  
 (내경 230 mm, 외경 417 mm, 높이 98 mm, 간격 10mm  
 전류 135 A, 55 turn, 5 layer)



a)  $B_z$ 의 분포

b) Flux line 분포

그림 3-3 Mirror 마그네트에 의한 자장분포  
 (내경 230 mm, 외경 417 mm, 높이 98 mm, 간격 300mm  
 전류 135 A, 55 turn, 5 layer)

소이다.

최적화 기법을 사용하기 위해서는 최적화의 대상이 되는 목적함수를 만들어야 하는데 부마그네트의 최적화를 위한 목적함수( $f$ )는 식 (4-1)과 같이 시료표면에서의 자장 수직도를 이용하여 구성하였다.

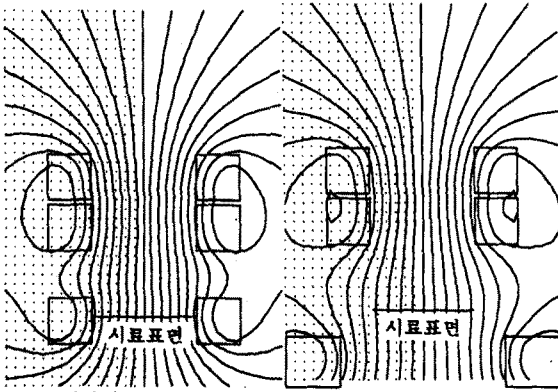
$$f = \frac{\Delta r \sum_{i=1}^n |B_z(X_i)/B(X_i)| r_i}{\Delta r \sum_{i=1}^n r_i} \quad (4-1)$$

목적함수,  $f$ 의 값은 3.2에서 구성된 자장해석기법을 이용하여 시료표면의  $i$  번째 위치 자장값과 위치 좌표의 함수이다.  $f=1$  은 자장과 시료표면이 수평한 상태로 비등방성이 가장 나쁜 상태이고  $f=0$  은 자장과 시료표면이 수직된 상태로 비등방성이 가장 좋은 상태이다.

이상으로부터 목적함수  $f$ 가 최소화( $f=0$ )될 때가 자장 수직성만을 고려한 경우의 마그네트의 최적화 상태를 알 수 있다.

최적화 변수로는 부마그네트의 내경, 외경, 높이, 위치, 전류 5개의 변수를 선택 하였다. 최적화 기법으로는 목적함수의 미분치가 필요치 않은 Powell(5) 방법을 사용하였으며, 물리적으로 가능한 최적화 변수영역 내에서 최적화 시키기 위해 Powell 방법 사용시 변수가 가능 영역을 벗어나면 경계와 만나는 위치로 되돌렸다.

그림 3-4는 최적화 기법이 적용된 초기상태(a)와 최적상태



a) 초기상태(부마그네트)      b) 최적상태(부마그네트)  
 ID= 110 mm, OD= 210 mm      ID= 147 mm, OD= 300 mm  
 H = 108 mm, AT= 20000 A      H = 20 mm, AT= 9199 A

그림 4-1. 초기상태와 최적화된 상태의 flux line 분포

(b)의 flux line 분포를 나타내고 있다. 최적화된 마그네트의 시료표면 flux line 형상이 초기상태의 flux line 형상보다 수직성이 개선되어 초기상태의 수직도가 70%인 반면에 최적상태의 수직도는 99%이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 자장해석 프로그램을 이용하여 주마그네트의 flux line과 자장 분포를 구하였으며 부마그네트의 최적화 프로그램을 이용하여 시료표면에서의 자장 수직도를 99.9%로 개선하였다. 설계된 마그네트의 실증 실험이 수행될 예정이며 마그네트의 열 해석도 조만간 완성될 것이다. 1차의 실증 실험을 통해 마그네트의 열 계수들에 대한 확인이 이루어지면 자장해석 프로그램과 열해석 프로그램을 조합하여 최종적인 ECR용 마그네트 설계 및 해석 프로그램을 완성하려 한다.

#### 6. 참고문헌

- 1) Seiji Samukawa, Sumio Mori and Masami Sasaki,  
 "Dependence of ECR Plasma Etching Characteristics on Sub Magnetic Field and Substrate Position",  
 Jpn. J. Appl. Phys. Vol 29, No 4, April 1990.  
 p 792-797
- 2) D. Bruce Montgomery and Robert J. Weggel,  
 "MHD and Fusion Magnet", John Wiley, 1982
- 3) Richard J. Thome and John M. Tarry,  
 "Solenoid Magnet Design"  
 Robert E. Krieger Publishing Company, 1980
- 4) Milton Abramowitz and Irene A. Stegun,  
 "Handbook of Mathematical Functions with Formulas,  
 Graphs and Mathematical Tables."
- 5) William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky  
 and William T. Vetterling : "Numerical Recipes in C."