

# 폴피스에서 자장과 초점 거리의 관계 Relationship between Magnetic Field and Focal Length in Polepiece

\*, #임선종<sup>1</sup>, 강재훈<sup>2</sup>

\*, #S. J. Lim<sup>1</sup>(sjlim@kimm.re.kr), J. H. Kang<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> 한국기계연구원, 지능형생산시스템연구본부

Key words : Polepiece, Magnetic field, Focal Length, Electron beam path, Principal plane

## 1. 서론

전자빔 응용 시스템에서 사용되는 마그네틱 렌즈 (Magnetic lens)의 초점 기능은 렌즈를 통과하는 전자의 속도, 자장의 세기에 의해 발생된 힘이 전자의 이동 경로에 영향을 미쳐 생기게 된다. 실제 전자는 렌즈를 통과할 때 나선형의 경로를 갖게 되며 이것으로 초점 거리가 생기게 된다. 이 초점 거리는 자장의 세기가 커지면 짧아지게 된다. 자장의 세기는 렌즈에 흐르는 전류에 비례하게 된다. 또한 초점 거리는 가속 전압의 영향을 받게 된다. 만일 같은 자장의 세기를 가진 렌즈의 경우 가속 전압이 클수록 초점 거리는 길어지게 된다.

초점 거리는 집속 렌즈의 경우 스팟 사이즈를 조종하게 되며 이것은 배율과 관계된다. 대물 렌즈의 경우 초점 거리는 렌즈 축을 따라 크로스오버의 위치를 조종하여 초점을 맞추게 된다. Working distance의 증가에 따라 초점 거리가 증가된다. 따라서 렌즈를 통과하는 전자빔의 이동 경로를 해석하는 것은 렌즈의 기능을 해석하는 것이 됨으로 중요한 요소이다<sup>1,4</sup>.

본 논문은 전자빔이 통과되는 렌즈의 특성을 나타내는 초점 거리와 초평면 위치를 전자빔 경로를 바탕으로 설명하였다. 외부에서 전기장의 영향은 없으며 수차의 영향도 고려하지 않았다. 이것은 렌즈의 기본적인 성능을 파악하는데 활용될 수 있다.

## 2. 렌즈를 통과하는 전자에 미치는 힘

자장을 Fig. 1과 같이 렌즈의 입구, 중심 그리고 출구로 표시하자. 입구에서 자장은 렌즈 중심축을 향한 성분  $B_r$ 이 전자에 영향을 미친다. 중심 영역의 경우 렌즈 중심축과 일치하는 방향의 자장의 성분  $B_z$ 이 전자에 영향을 미친다. 출구의 경우 렌즈의 중심축에서 외부로 향하는 자장의 성분  $B_r$ 이 영향을 미친다. 따라서 각 영역에서 전자가 받는 힘의 방향이 다르게 되며 이를 Fig. 1에 나타내고 있다. 자장 내에서 전자는 나선형의 움직임을 가지므로 각 영역에서 전자의 회전 반경은 작아지게 된다.

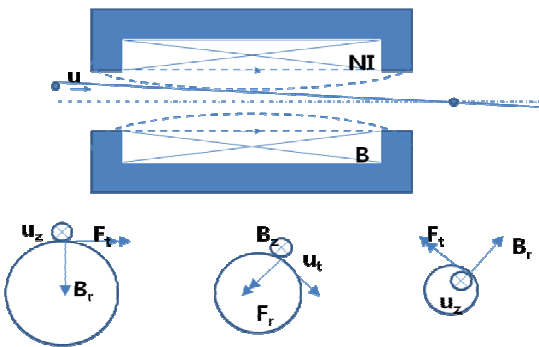


Fig. 1 Magnetic electron lens

힘의 크기와 방향은 식(1)과 같이 벡터로 표현된다. 여기서  $F$ 는 속도  $v$ 를 가진 전자에 미치는 힘,  $B$ 는 자장의

세기,  $e$ 는 전자의 전하량을 나타낸다.

$$F = -e(v \times B) \quad (1)$$

## 3. Paraxial ray equation

Fig. 2와 같은  $(r, \theta, z)$  좌표계에서 질량  $m_e$ 를 가진 전자의 방사성 방향의 힘은 식 (2)와 같이 표시된다.

$$F_r = m_e \left[ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서  $\frac{d^2 r}{dt^2}$ 는 시간에 대한 반경의 변화이며  $r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2$ 는 원운동에 의한 원심력이다.

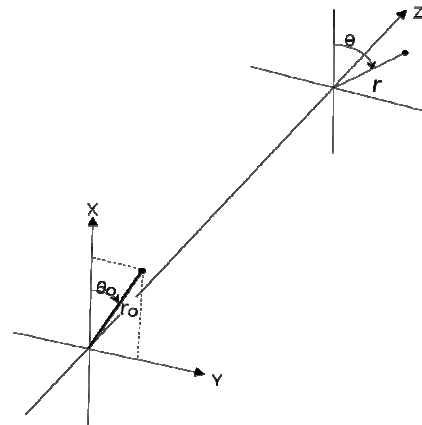


Fig. 2 Right-handed cylindrical coordinates and their relation to right-handed Cartesian coordinates

$F_r$ 은 radial electric field  $E_r$ 과 축 방향의 자속 밀도  $B_z$ 내에서의 운동에 의해 발생된다. 따라서 아래의 식으로 정리된다.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m_e} \left[ E_r + r \frac{d\theta}{dt} B_z \right] \quad (3)$$

Angular momentum의 변화율이 힘의 moment와 같다는 것과 전자빔 궤적을 통과하는 반경  $r$ 로 둘러 쌓인 magnetic flux와 이것의 변화율을 고려하여 정리하면 정정계와 자속이 존재하는 곳에서의 전자빔 경로는 식 (4)와 같이 정리된다.

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{1}{2V} \frac{dV}{dz} \frac{dr}{dz} + \left( \frac{1}{4V} \frac{d^2 V}{dz^2} + \frac{e}{8meV} B_z^2 \right) r = 0 \quad (4)$$

식(4)에서 자속만 존재하는 경우와  $z=0$ 에서 초기 조건을  $r=r_0$ 와  $r'=0$ 으로 하는 경우 식 (5)를 얻게 된다.

$$r = r_0 \cos \left[ \left( \frac{eB_0^2}{8m_e V} \right)^{\frac{1}{2}} z \right] \quad (5)$$

렌즈의 출구에서 빔의 이동 반경을  $r_2$  라고 하고 기울기를  $\theta_2$  라고 하면 식(6), (7), (8)을 구하며 weak lens 에 대해 초점 거리와 반경 및 기울기의 관계를 이용하면 초평면의 위치를 구하게 된다.

$$r_2 = r_0 \cos \varepsilon \quad (6)$$

$$r_2' = -\left(\frac{r_0}{L}\right) \varepsilon \sin \varepsilon \quad (7)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{eB_0^2}{8m_e}\right)^{\frac{1}{2}} L \quad (8)$$

이러한 관계를 Fig. 3 과 같이 제작된 렌즈에 대해 적용하여 풀면 초점 거리와 초평면의 위치를 계산하게 된다.



Fig. 3 Magnetic electron lens

#### 4. 결론

본 논문은 자장만 존재하는 것으로 가정하고 수차의 영향을 고려하지 않은 상태에서 렌즈를 통과하는 전자빔의 초점 거리와 초평면의 위치를 계산을 보이고 있다. 이러한 계산을 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전자 렌즈의 특징을 결정하는 초점 거리를 계산하여 어퍼처의 위치, 컬럼의 길이, 두 번째 집속 렌즈에서 초점 거리 등을 추정할 수 있게 된다. 이것은 컬럼 설계를 위한 기본값으로 활용된다.
- (2) 대물 렌즈의 경우 전류의 크기에 따라 영상이 회전하므로 가속 전압, working distance 를 고려하여 초점 거리를 계산하여야 한다.

#### 참고문헌

1. John, T. L. T., "ELECTRON BEAM TESTING TECHNOLOGY," pp. 129-172, 1993.
2. 임선중, 이찬홍, "Focal length 에 의한 전자 렌즈의 제어 신호 생성을 위한 하드웨어 설계," 한국공작기계학회지, Vol. 16, No. 5, pp. 96-100, 2007.
3. 임선중, 이찬홍, "주사 전자 현미경에서 전자빔 프르브 생성을 위한 소프트웨어 설계," KSPE 춘계 학술대회, pp. 467-468, 2007.
4. Josept, I. G., Dale, E. N., Patrick, E., David. C. J., Roming, A. D., Charles. E. L., Charles, F. and Eric, L., "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis," Plenum press, pp. 21-60, 1992.