

## 300keV가림막식전자묶음가속기에서 전자묶음자리길계산

우영남, 김혁

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학기술을 발전시키는것은 나라의 경제를 빨리 발전시키기 위한 중요한 담보입니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 133페이지)

가림막식전자묶음가속기는 저에너지(75~500keV)전자가속기로서 중합물의 가교, 자동차바퀴의 고속류화처리, 의요기구 및 식료품의 멸균소독, 방직섬유의 성능개선을 비롯하여 전기 및 전자재료, 금속 및 나노재료의 가공처리분야에서 광범히 리용되고있다.[1] 그러므로 실용적가치와 응용잠재력이 매우 큰 가림막식전자묶음가속기를 설계, 제작하는데서 나서는 리론실천적문제들을 해결하는것은 매우 중요한 문제로 제기된다.

이 논문에서는 CST(Computer Simulation Technology) STUDIO SUIT 2015프로그램을 리용하여 가림막식전자묶음가속기에서의 전자묶음가속을 위한 최량3차원정전기마당포텐셜을 얻고 전자묶음자리길계산을 진행하였으며 고압전기마당속에서 전자묶음전류전송에 주는 살창극의 기하학적형태의 영향을 평가하였다.

### 1. 모의계산실험의 리론적기초

가림막식전자묶음가속기의 전자총구조와 고압전기마당의 구체적인 형태는 가림막식전자묶음가속기의 설계를 좌우하는 관건적인 문제이며 이러한 기술은 선행연구들에서 동작원리와 튜박적인 구조만 보여주고 구체적인 관련기술과 수자들은 공개하지 않고있다.

#### 1) 정전기마당방정식의 리산화

CST프로그램은 3차원전자기마당계산에 널리 리용되고있으며 계산기초는 유한적분계산법이다. 다른 계산법들과는 달리 유한적분계산법은 막스웰방정식의 적분형식을 리용하며 미분형식을 리용하지 않는다.[2]

프로그램에서는 계산구역분할을 직6면체그물격자형태로 하며 직각자리표계에서 계산구역을 여러개의 요소로 분할한다.

$$G = \{V_{i,j,k} \in R^3 | V_{i,j,k} = [x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}] \times [z_k, z_{k+1}], \\ i=1, \dots, I-1, j=1, \dots, J-1, k=1, \dots, K-1\} \quad (1)$$

분할후 계산구역에서 총그물격자점의 개수는  $N_p = I \cdot J \cdot K$  이며 총그물격자수는  $(I-1) \cdot (J-1) \cdot (K-1)$  이다. 요소  $G$ 를 도입하고  $G$ 속에서 단일요소체적  $V_{i,j,k}$ 를 선택하면 적분형식은 다음과 같다.

$$\oint_{\partial A} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{s} = - \iint_A \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A} \quad (2)$$

방정식 (2)를 리산화하면 다음과 같다.

$$\hat{e}_x(i, j, k) + \hat{e}_y(i+1, j, k) - \hat{e}_x(i, j+1, k) - \hat{e}_y(i, j, k) = -\frac{d}{dt} \hat{b}_z(i, j, k) \quad (3)$$

여기서  $\hat{e}_x(i, j, k) = \int_{(x_i, y_j, z_k)}^{(x_{i+1}, y_j, z_k)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$  는 면  $A_z(i, j, k)$  가운데서 한번의 전압이며 이 변에 따르는 전기마당적분의 정확한 값을 나타낸다. 스칼라값  $\hat{b}_z(i, j, k) = \int_{A_z(i, j, k)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$  는 자기전류를 나타낸다. 즉  $A_z(i, j, k)$  를 통과하는 자속밀도의 적분값이다. 식 (3)을 행렬형식으로 표시하면 다음과 같다.

$$C\hat{e} = \hat{b} \quad (4)$$

행렬  $C$ 는 단위행렬결수  $C_{ij} \in \{-1, 0, 1\}$  일뿐이며  $G$ 내부의 리산화연산을 표시한다.

$\hat{e} = -G\Phi$  이고  $G = -\tilde{S}^T$  임을 고려하면 최종적으로 계산에 필요한 전기마당의 적분형식을 얻을수 있다.

$$\tilde{S}M_g\tilde{S}^T\Phi_e = q \quad (5)$$

여기서  $M_g$ 는 전기매질특성을 나타내는 대각정의행렬이며  $q$ 는 전체 류량이다.

## 2) 전자의 운동방정식의 리산화

CST프로그램에 의한 전자자리길계산에서는 앞에서 계산한 리산전기마당을 기초로 하여 전자의 운동방정식을 리산화하며 이때 운동방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} &= q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \Rightarrow m^{n+1}\mathbf{v}^{n+1} = m^n\mathbf{v}^n + \Delta t \cdot q(\mathbf{E}^{n+1/2} + \mathbf{v}^{n+1/2} \times \mathbf{B}^{n+1/2}) \\ \frac{d\mathbf{r}}{dt} &= \mathbf{v} \Rightarrow \mathbf{r}^{n+3/2} = \mathbf{r}^{n+1/2} + \Delta t \cdot \mathbf{v}^{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

식에서 알수 있는것처럼 전자자리길계산에서는 먼저 계산된 전자기마당에 의하여 전자의 자리길을 계산한다. 하지만 가림막식전자빔가속기에서 전자의 운동은 주로 정전기마당에 의해 결정되며 전자빔음전류에 의해 려기된 자기마당이 전자의 자리길에 주는 영향을 무시할수 있으므로 우에서 서술한 자기마당항을 소거해버리면 전자자리길계산방정식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} &= q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \Rightarrow m^{n+1}\mathbf{v}^{n+1} = m^n\mathbf{v}^n + \Delta t \cdot q\mathbf{E}^{n+1/2} \\ \frac{d\mathbf{r}}{dt} &= \mathbf{v} \Rightarrow \mathbf{r}^{n+3/2} = \mathbf{r}^{n+1/2} + \Delta t \cdot \mathbf{v}^{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

웃식들에서 화살표의 왼쪽은 운동량과 위치에 대한 해석적인 방정식이며 오른쪽은 리산화한 방정식이다.

## 2. 계산결과와 분석

CST프로그램을 리용하여 대상의 구체적인 도형을 설계하고 경계조건설정, 재료설정, 전자원천설정, 그물격자나누기를 진행한 다음 반복모의계산을 진행하여 합리적인 파라메터들을 얻고 결과분석을 진행하였다.

### 1) 전자총구조와 집초극전위계산

가림막식전자빔음속기의 전자총은 두 단계의 가속간극을 가진 가속공동이며 구조상 특징으로부터 가속기의 본체와 같다고 볼수 있다. 전자총은 음극가열섬조(재료 W), 집초극, 살창극, 양극으로 구성되어있다.

음극가열섬조는 고진공분위기에 놓여있으며 가열섬조에는 부(-)의 고전압을 걸어준다. 단일가열섬조전자총구조에서 음극가열섬조는 긴 선형태이며 집초극은 원통형이고 음극주위를 고리형으로 둘러싸고있다. 살창극도 원통형이며 양극의 인출위치에는 긴 선형태의 음극가열섬조와 평행인 가늘고 긴 틈이 뚫어져있다. 음극과 살창극사이의 전압은 보통 수백V이며 금속티탄박막창문은 양극으로서 접지되어있다.

음극, 살창극, 양극의 전위는 외부에서 걸어주는 전압이지만 집초극전위는 전자총의 기하학적구조에 의존하는 정전기유도되는 전압이며 전자총의 전기마당과 전자자리길을 계산하려면 집초극전위를 먼저 결정하여야 한다. 집초극의 전위를 확정하기 위하여 가열섬조와 집초극은 하나의 원기둥형콘덴서를 구성한다고 보며 이때 단위길이당 전기용량은 다음과 같다.

$$C = \left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right) \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln R - \ln r} \quad (8)$$

여기서  $R$  는 집초극내부원기둥반경,  $r$  는 가열섬조반경,  $\epsilon_0$  은 진공속에서 유전률,  $\theta$  는 집초극립체각이다.  $t$ 시각에 집초극전위가  $V$ 라고 하면 집초극에 루적되는 전자의 전하량은  $Q = CV$  이다. 집초극의 단위길이에 대하여 다음의 식이 성립한다.

$$C \frac{dV}{dt} = \frac{dQ}{dt} = (2\pi - \theta)rJ \quad (9)$$

여기서  $J$  는 전류밀도이며

$$J = \frac{4\pi em}{h^3} (kT)^2 \exp\left(-\frac{\phi + eV}{kT}\right) \left(1 + \frac{eV}{kT}\right) \quad (10)$$

이다.[3] 여기서  $m$ 은 전자의 질량이며  $T = 2200K$ ,  $V = 300kV$ ,  $\phi = 4.52eV$  (방출일),  $R = 10mm$ ,  $r = 0.8mm$  이며 다음과 같은 방정식을 쓸수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{4\pi rem}{\epsilon_0 h^3} (kT)^2 e^{-\frac{\phi + eV}{kT}} \left(1 + \frac{eV}{kT}\right) \ln \frac{R}{r} \quad (11)$$

Matlab 7.5를 리용하여 진행한 수값계산결과에 의하면  $V$ 값은 매우 빨리 수렴하며 10.5V에서 포화값에 도달한다. 즉 집초극전위는 10.5V로 결정한다.

### 2) 정전기마당계산

계산실험에서는 집초극전위를 결정한 다음 살창극에는 150~400V의 전압을, 양극에는 300kV의 전압을 걸어준다. 따라서 살창극을 기준으로 고찰하면 살창극내부에는 약한 전기마당 ( $E_0 \approx 10^3 V/m$ ) 이 걸리며 살창극외부에는 강한 전기마당 ( $E_1 \approx 10^6 V/m$ ) 이 걸린다. 모의설계된 전자총에서 계산된 정전기마당의 분포를 그림 1의 ㄱ)에서 보여준다. 전자는 음극에서 방출된 후 음극표면근방에서 밖으로 향하는 척력을 받게 되며 집초극을 통과하여 살창극공간까지 운동한다. 다음 전자는 살창극전기마당의 작용력을 받아 살창극구멍에 도달한다. 살창극내부에서 살창극외부로 넘어갈 때 전기마당의 변화는 급격하며 전자의

운동자리길을 급격히 변화시켜 전자빔음이 살창극틈을 통과하여 가속공동으로 들어가게 한다.

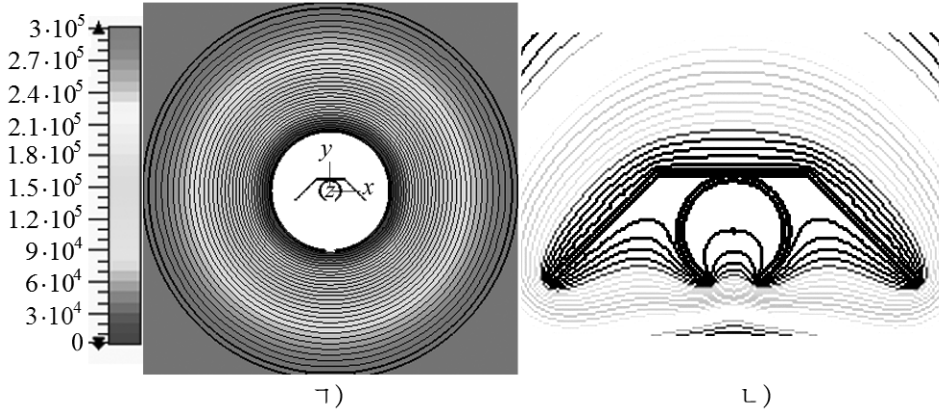


그림 1. 전자총에서의 정전기마당분포

ㄱ) 전자총에서  $z=0$ 에서 전기마당포텐셜, ㄴ) 집초극에서 전기마당포텐셜  
음극전압  $-300\text{kV}$ , 살창극전압  $300\text{V}$

그림 1의 ㄴ)에서 집초극은 원통형과 사다리형이 결합된 전극으로 이루어져있으며 원통형전극은 집초작용을 하는 동시에 가열섬조의 열복사를 부분적으로 반사시켜 가열섬조의 열손실을 감소시키며 사다리형전극은 원통형전극틈을 빠져나온 전자빔음의 발산을 억제하고 집초극을 뿔각시키는 작용을 한다. 살창극틈의 폭  $2a$ 는 비교적 좁기때문에(여기서는  $10\text{mm}$ ) 살창극틈의 렌즈효과는 박막구멍렌즈인 경우로 볼수 있다.(그림 2) 이때 전기마당의 세기는  $E_1 > E_0$ 이며 전자빔음은 살창극틈에서 집초작용을 받는다.

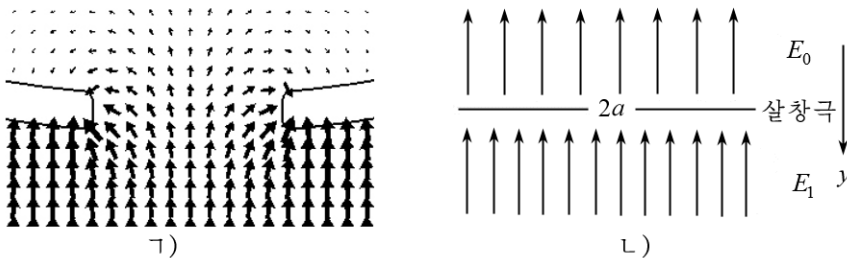


그림 2. 살창극틈에서 전력선분포

ㄱ) 살창극틈에서 모의계산된 전력선분포, ㄴ) 살창극틈내부와 외부에서 전기마당의 세기

이때 살창극틈에서 전위는 다음과 같이 쓸수 있다.[4]

$$V = V_g + E_0 z + \frac{1}{2} E_1 \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(y^2 - z^2 + a^2)^2 + 4y^2 z^2} - (y^2 - z^2 - a^2) + z \right] \quad (12)$$

여기서  $V_g$ 는 살창극전압이며  $a$ 는 살창극틈의 반폭이다.

살창극에 도달한 전자빔음은 살창극외부의 강한 전기마당의 전력선을 따라 빠르게 운동한다.

### 3) 전자빔음자리길계산

전자빔음자리길계산은 식 (6)과 (7)에 기초하여 계산하며 그 결과는 그림 3과 같다.

그림 3의 ㄱ)에서 보는것처럼 음극에서 열방출되어 나온 전자는 집초극틈에서 1차 집초되고 살창극까지의 공간(첫번째 가속구간)을 비행하면서 일정하게 분산되며 살창극틈을 통과하면서 전자묶음은 다시 집초되었다가 양극까지의 공간(두번째 가속구간)에서는 분산가속된다. 그림 3을 고찰하면 살창극틈과 집초극틈에서 전력선은 볼록 올라와있으며 이것은 기하광학의 견지에서 볼 때 볼록렌즈에 해당하며 집초작용을 한다. 전자총의 크기와 형태 특히 살창극원통직경, 살창극과 티탄창문사이의 거리는 전자묶음인출의 중요한 인자이며 따라서 전자묶음자리길을 계산하여야 대응하는 파라미터들을 결정할수 있다.

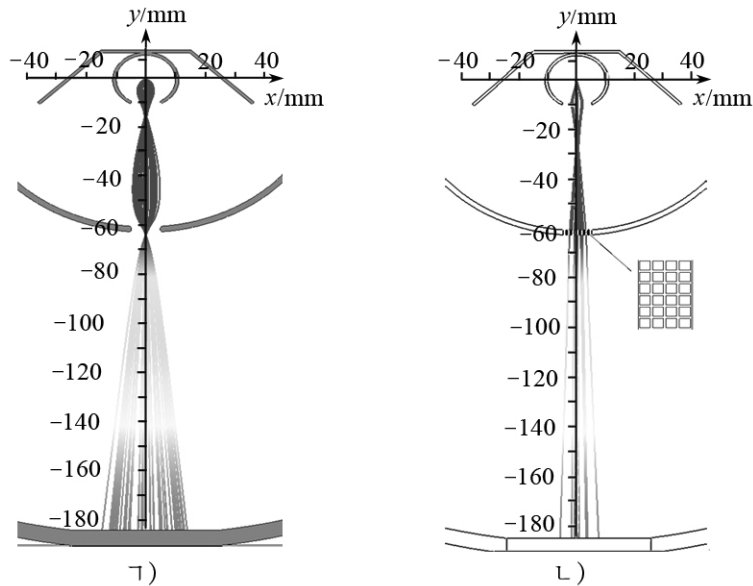


그림 3. 전자묶음자리길  
ㄱ) 살창격자가 없는 경우, ㄴ) 살창격자가 있는 경우

모의계산에서는 편리를 위해 음극전기포텐셜을 0V, 양극전압은 300kV, 살창극전압은 각각 150~400V사이에서 50V간격으로 설정하였다. 모의계산을 통하여 얻은 집초극반경은 10mm, 살창극반경은 60mm, 양극반경은 185mm이다. 이때 음극전압은 -300kV, 살창극전압은 300V, 가열집조의 길이는 500mm, 온도는 2 000℃이다. 살창극전압을 증가시킬 때 집초거리는 약간 달라지지만 현저한 차이는 없으며 살창극을 빠져나오는 전자수는 300V까지는 증가하다가 그 이상의 전압에서는 변화가 없다. 따라서 살창극전압은 300V로 설정하는것이 좋다. 전자총의 이러한 물리적설계조건과 기하학적형태에서 출발전자묶음의 60%가 인출창문에 도달한다.

그림 3의 ㄴ)는 살창극틈에 모양은 4각형이고 크기가 1mm인 살창격자를 삽입한 경우의 전자묶음자리길의 모양이다. 그림 3의 ㄱ)와 비교해볼 때 전기마당의 변화로 하여 살창극틈에서 전자묶음에 대한 집초작용은 없어지며 티탄창문에 도달한 전자묶음의 분산은 작고 전자묶음의 균일성이 좋아진다. 그러나 살창격자가 없는 경우에 비하여 살창격자에 부딪치는 일부 전자들이 존재하므로 수%의 전자묶음손실이 발생한다. 살창격자가 없는 경우(그림 3의 ㄱ))  $x_{최소} = -13.4\text{mm}$ ,  $x_{최대} = 1.3\text{mm}$ 이며 살창격자가 있는 경우(그림 3의 ㄴ)) 전자묶음분산의

최소, 최대위치는  $x_{\text{최소}} = -7.3\text{mm}$ ,  $x_{\text{최대}} = 6.9\text{mm}$ 로서 전자빔음의 분산은 현저히 감소된다.

## 맺는 말

논문에서는 300keV가림막식전자빔음속기에서 정전기마당분포와 전자빔음자리길을 계산하고 집초극과 살창극, 양극과 관련된 전자총설계 및 제작에 필요한 중요파라미터들을 확정하였으며 살창극격자의 유무와 크기가 전자빔음인출과 분산, 균일성에 큰 영향을 준다는것을 밝혔다.

## 참고 문헌

- [1] R. C. Sethi; Electron Beam Technology for Industrial Accelerators, 1, 1~3, 2016.
- [2] M. Clemens et al.; Progress in Electromagnetics Research, 32, 65~87, 2001.
- [3] Wang Zhicheng; Thermodynamics and Statistical Physics, 2, Beijing High Educational Press, 60~80, 1993.
- [4] Dai Shiqiang; Static Electricity and Electrodynamics, Beijing Scientific Press, 56~80, 1981.

주체108(2019)년 3월 5일 원고접수

## Calculation of Electron Beam Trajectory for 300keV Electron Curtain Accelerator

*U Yong Nam, Kim Hyok*

In this paper the distribution of third dimension optimized static electric field was obtained and electron beam trajectories were calculated at 300keV electron curtain accelerator by using CST code, the main parameters for design and manufacture of focusing electrode, lattice electrode and anode electrode of electron gun were decided. And it was found that existence or nonexistence and its size of grid intensely affected the lead-out, dispersion and homogeneity of electron beam.

Key words: electron curtain accelerator, CST Code, electron beam trajectory