

17.5GHz gyrotwystron을 위한 magnetron injection gun의 설계

하현준 김정인 박건식
서울대학교 물리교육과

서론

gyrotrotron에는 여러 가지 형태가 있는데, 그 중 이 논문에서 언급되는 gyrotwystron은 좋은 효율을 유지 하면서 더 넓은 주파수대(>1%BW)를 갖기 위해 개발되고 있다. 이것은 cavity 형태와 waveguide 형태의 interaction circuit을 동시에 이용하여 높은 효율(>30%)과 넓은 주파수 대역폭(>3%BW)을 갖도록 하는 것이다. 이 논문에서는 17.5 GHz gyrotwystron을 위한 300kW, 60kV, $\alpha(\equiv v_x/v_z)=1.2$, $\Delta v_z \leq 5\%$ 인 MIG을 E-gun code를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 설계하였다. 실험 변수들(전자빔의 전압, 전류, 자기장)과 설계 변수들(cathode 변수 등 MIG의 여러 내부 변수 등)이 변할 때 전자빔의 특성 중 특히 전자빔의 axial velocity spread(Δv_z)의 변화를 연구하였다.

MIG설계

MIG은 분석적인 방정식을 이용하여 얻은 변수들을 c-gun code를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 설계 할 수 있다. 이러한 MIG의 설계 방정식은 각운동량의 보존, 전자 궤도의 단열(adiabatic)임의 가정과 space charge의 효과가 매우 낮다는 가정에서 기초하여 만들어진다. 주요한 설계방정식들은 다음과 같다.

$$r_c^2 = B_0/B_{zc}(r_a^2 - r_L^2), \quad E_c = \frac{m_e c^2}{e} \left(\frac{\phi_a \cos \phi_c}{\ln(1+D_{FI})} \right) \frac{1}{r_c}, \quad d = (D_F \mu / \cos \phi_c) r_c, \quad (\text{단, } \mu = 1/\sqrt{r_a^2/r_c^2 - 1})$$

$$\phi_a = \frac{eV_a}{m_e c^2} = \frac{\ln(1+D_{FI})}{\ln(1+2\mu)} \left\{ \left[1 + \frac{4}{\mu^2} \left(\frac{1+\mu}{1+2\mu} \right)^2 \left(\frac{\gamma_0^2 - 1}{R_c^2 \cos^2 \phi_c} \right) \left(\frac{\alpha_0^2}{\alpha_0^2 + 1} \right) \right]^{1/2} - 1 \right\}$$

여기에서 r_c 는 cathode의 반지름, E_c 는 cathode에서의 전기장, d 는 cathode와 mod-anode 사이의 거리, ϕ_c 는 cathode의 각도이다.

우리가 원하는 주파수인 17.5GHz에서 TE₀₁의 mode 형태를 사용하고, B_0/B_{zc} (compression ratio)를 15라고 하면 이 설계방정식을 통해 결정된 설계 변수들은 다음과 같다.

$$r_c = 1.99\text{cm}, \quad B_{zc} = 428\text{G}, \quad d = 1.822\text{cm}$$

여기에서 α 는 1.2이고 ϕ_c 는 30°로 정하였다.

시뮬레이션 결과 및 토의

위에서 설계 방정식에 의해 결정된 MIG설계 변수들(r_c , ϕ_c , d , ϕ_a)은 컴퓨터 시뮬레이션의 초기 조건으로 사용되었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 MIG의 내부변수들이 변함에 따라 α , Δv_z 가 어떻게 달라지는지를 살펴봄으로써 제작 과정에 따른 오차(MIG 내부 구조)와 실험 과정에 따른 오차(beam voltage, 자기장)에 민감하지 않은 MIG을 설계할 수 있을 것이다. 여기서 사용한 모형은 단순화된 것이고, cathode의 가장자리에서 나오는 전자빔의 효과도 고려하였다.

또한 MIG 설계방정식을 통해 구할 수 없는 anode 변수(mod anode와 anode 사이의 거리(s_1))와 평행한 부분의 길이(s_2))에 대해 먼저 결정해 주어야 한다. anode 사이의 거리뿐만 아니라 두 anode 사이의 평행한 부분의 길이도 MIG 내의 E-field에 큰 영향을 미치기 때문이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 $\alpha=1.2$ 이고, Δv_z 가 최소($\sim 1.5\%$)가 되는 anode 변수를 정하였다. mod anode 까지의 길이는 60mm, 평행한 부분의 길이는 23.5mm, mod anode와 second anode 사이의 거리는 7mm로 정하였다.(실제로는 6.8mm정도이다.)(그림-1)

이렇게 하여 결정된 설계가 다른 변수들(B_0 , V_a , r_c , ϕ_c , d)에 변할 때 얼마나 민감하게 변하는가를 살펴보았다. (그림-2, 그림-3, 그림-4, 그림-5, 그림-6, 그림-7)

결과

17.5GHz gyrotwystron에 쓰일 annular 전자빔을 만들기 위해 magnetron-injection-gun을 설계하였다. 60kV, 5A의 전자빔의 axial velocity spread는 α 가 1.2일 때 1.5%까지 맞출 수 있었다. MIG의 설계변수에 대해서는 전자빔의 특성이 민감하게 변하지 않았으나 상대적으로 실험변수들(B_0 , V_a)들에 대해서는 다소 민감하게 변했다. 이는 전자빔의 cathode의 위치 재조정과 MIG의 내부 dimension을 조정함으로써 극복될 수

있다.

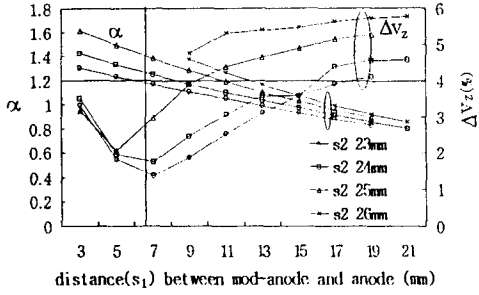


그림-1 anode 변수 결정

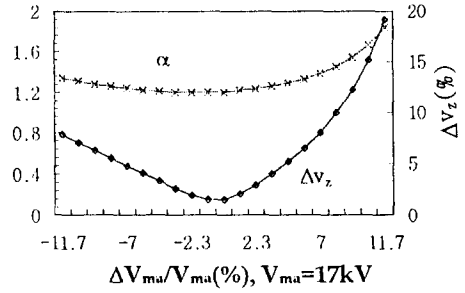


그림-2 mod anode voltage 변화

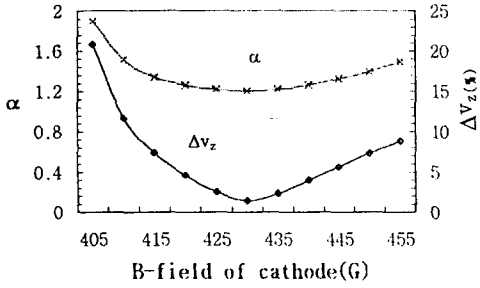


그림-3 cathode에서의 자기장 변화

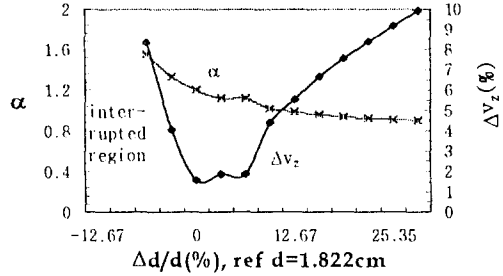


그림-4 cathode와 mod-anode 사이의 거리 변화

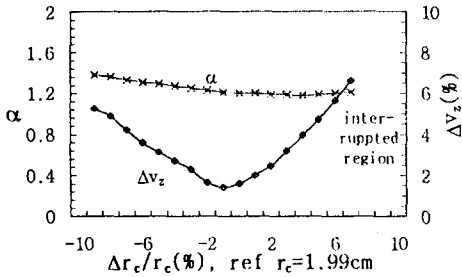


그림-5 cathode 반지름 변화

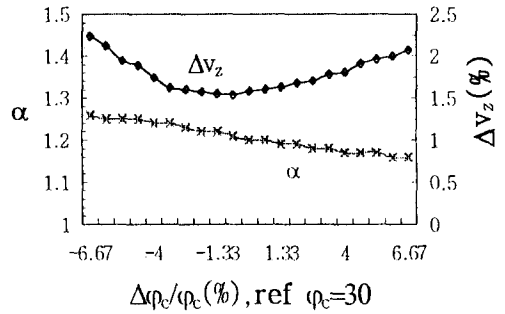


그림-6 cathode angle 변화

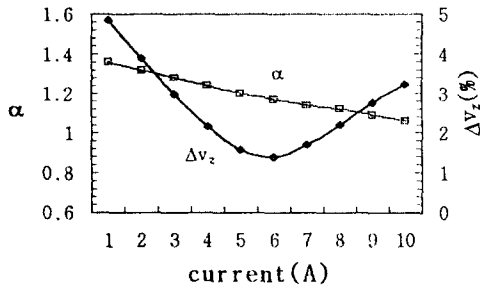


그림-8 전류의 변화

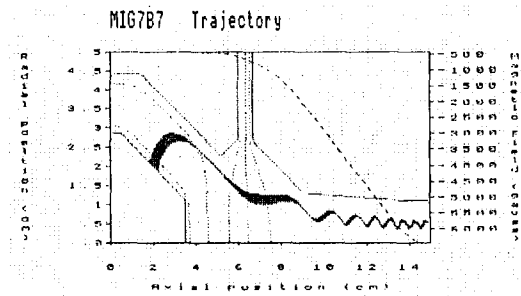


그림-8 MIG 시뮬레이션 결과