

전자총에서의 온도분포와 열력학적변형특성

안명진, 우영남

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 어떻게 하나 과학과 기술을 발전시키고 과학기술에 의거하여 살아나갈 생각을 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제27권 270페이지)

전자총은 전자가속기의 가장 중요한 핵심부분이며 전자발생원천으로서 여러가지 진공응용설비에서 각이한 용도로 널리 리용되고있다.

가림막식전자가속기는 방직제품변성, 도료층의 경화, 열수축성박막제조, 고무류황화, 공기와 식료품의 고속멸균소독, 에나멜도선의 절연세기체고, 고급가구조임치리를 비롯한 여러가지 가공반응을 진행하는데 널리 리용되는 전자묶음조임장치이다.[1, 2]

론문에서는 응용전망이 좋고 응용잠재력이 매우 큰 가림막식전자가속기전자총의 온도분포 및 열력학적변형특성에 대한 모의계산을 진행하고 그 설계와 제작에 필요한 몇가지 물리적파라미터를 결정하였다.

1. 이론적고찰

가림막식전자가속기는 가속에너르기가 보통 150~300keV정도이며 가림막형태의 전자묶음을 인출할수 있다.

또한 장치구조가 비교적 간단하고 한번에 넓은 면적의 가공제품에 전자묶음을 조일수 있으며 출력이 높은 우점을 가지고있다. 한편 주사장치가 없고 장치의 크기가 작으며 표적에 전자묶음을 조일 때 발생하는 X선에 대한 차폐방어가 간단하여 임의의 생산흐름공정에 직접 설치할수 있다.

전자묶음조임의 견지에서 가열섬조의 축방향과 조임을 받는 물체의 운동방향이 수직인 가림막식전자가속기를 가로형가림막식전자가속기, 가열섬조의 축방향과 조임을 받는 물체의 운동방향이 평행인 가속기를 세로형가림막식전자가속기라고 한다.

또한 열전자발생방법에 따라 직접가열식 및 간접가열식전자가속기로 나눈다. 직접가열식전자가속기는 음극량단에 전압을 걸어주어 전류가 흐를 때 발생하는 줄열에 의해 음극이 직접 가열되어 열전자를 방출하는 전자묶음가속기이다.

론문에서는 직접가열식가림막식전자가속기의 전자총을 연구대상으로 하였다.

직접가열에 의한 가림막식전자가속기의 본체는 기본상 음극(가열섬조), 반사극, 살창극, 양극, 티탄 혹은 알루미늄창문으로 구성되어있다.

직접가열에 의한 가림막식전자가속기가 동작할 때 음극은 열전자를 4π 공간으로 방출시킨다. 방출된 전자들의 일부는 살창극쪽으로 직접 끌려가며 많은 몫의 전자들은 반사극과 부단히 탄성 및 비탄성충돌을 일으킨다.

반사극은 음극으로부터 방출된 전자들이 살창극쪽으로만 인출되게 하며 가열섬조의

열복사를 부분적으로 반사시켜 가열섬조의 열손실을 감소시킨다. 결국 이것은 열전자방출을 위한 가열섬조의 전력소모를 감소시킨다.

음극에서 방출된 전자들은 살창극에서 집초되어 기본가속구역으로 들어가 부하전류를 형성한다. 부하전류의 크기는 살창극전압을 변화시키는 방법으로 조절할수 있다.

전자들은 가속구역을 통과하면서 에너지를 얻은 후 티탄 또는 알루미늄창문을 투과하여 쪼임구역에 들어간다.

음극으로부터 방출되는 전자뭉음전류흐름밀도는 Richardson공식[2]에 따라 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$J = 1.2 \cdot 10^6 T^2 \exp\left(-\frac{11 \cdot 600\phi}{T}\right) \quad (1)$$

여기서 T 는 가열섬조의 온도, ϕ 는 가열섬조재료의 방출일이다.

식 (1)로부터 음극으로서 윌프램을 리용하는 경우 전자뭉음전류흐름밀도는 가열섬조의 온도가 2 300K정도 될 때까지는 서서히 증가하다가 그다음부터는 급격히 증가하는 특성을 나타낸다는것을 알수 있다. 즉 온도가 높아질수록 전자뭉음전류흐름밀도가 커지며 그에 따라서 부하전류도 커진다.

그러나 가열섬조를 비롯한 전자뭉음가속기부분소재재료들의 특성과 가열섬조를 가열시키는데 드는 전력소비량, 고온에서 장치의 열력학적변형과 그로부터 초래될수 있는 각종 사고 등을 고려할 때 가열섬조의 온도를 무한정 높일수는 없다.

이로부터 전자뭉음가속기는 그 용도에 따라 가열섬조의 온도를 1 300~2 300K범위에서 보장하고있다.[3, 4]

전자뭉음가속기에서의 온도분포는 열전도와 열복사, 주위공기와의 대류열전달에 관계된다. 이 문제를 풀자면 비정상상태열전도방정식을 풀어야 하며 그 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) T + \nabla \cdot \mathbf{q} = \ddot{q} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 재료의 밀도, C 는 재료의 비열, T 는 온도, t 는 시간, \mathbf{V} 는 질량열수송에 관한 속도벡토르, \mathbf{q} 는 열흐름뭉음벡토르($\mathbf{q} = -k\nabla T$, k 는 열전도결수), \ddot{q} 는 단위체적당 열발생속도이다.

대류열교환에 대한 기본계산식은 다음과 같은 뉴톤의 랭각법칙에 의해 주어진다.

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = h_f (T_s - T_B) \quad (3)$$

여기서 \mathbf{n} 은 법선방향단위벡토르, h_f 는 대류열전달결수, T_s 는 표면의 온도, T_B 는 류체의 체적온도이다.

어떤 일정한 구역의 이웃한 표면들이나 그 구역과 주위사이의 복사에너지교환은 전반적인 열수송문제에 커다란 영향을 미칠수 있다. N 개의 표면들로 이루어진 계에서 슈테판-볼츠만법칙을 확장하면 에너지손실을 표면온도와 련관시키는 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (4)$$

여기서 N 은 복사표면의 개수, δ_{ji} 는 크로넥커델타기호, ε_i 는 표면 i 의 유효복사률, F_{ji}

는 형태인자, A_i 는 표면 i 의 면적, Q_i 는 표면 i 의 열손실, σ 는 슈테판-볼츠만상수, T_i 는 표면 i 의 절대온도이다. 형태인자 F_{ji} 는 다음의 식으로 표현된다.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} d(A_j) d(A_i) \quad (5)$$

여기서 A_i 와 A_j 는 표면 i 와 j 의 면적, r 는 두 표면사이의 거리, θ_i 와 θ_j 는 복사방향과 법선방향사이의 각이다.

가림막식전자가속기를 설계하고 제작하는데서 기본은 표적에 떨어지는 전자빔음전류의 불균일성을 최대한 감소시키는것이다. 전자빔음가속기가 동작상태에 있을 때 음극이 심히 가열되는것만큼 이것은 가속기구조물들의 열력학적인 변형을 일으키며 결과 가속기 내부에 형성되는 전기마당의 이지러짐을 발생시킨다.

그러므로 전자빔음가속기의 온도분포와 함께 장치의 열력학적인 변형특성 특히 가열점조의 처짐특성을 연구하는것은 전자빔음조임전류의 균일성을 보장할수 있도록 장치를 설계하는데서 중요한 문제로 나선다.

2. 모의결과와 분석

직접가열에 의한 가림막식전자가속기의 구조는 그림 1과 같다.

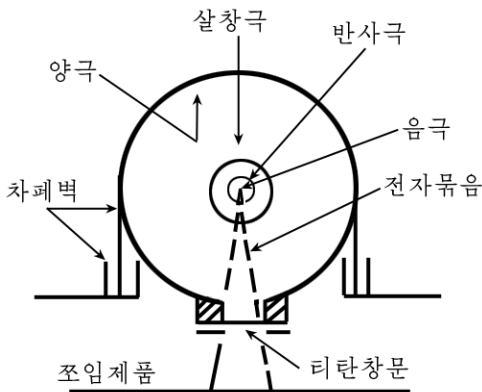


그림 1. 직접가열에 의한 가림막식 전자가속기의 구조

반사극과 살창극에 의한 전자빔음의 집초와 목적하는 부하전류 및 빔음의 균일성이 보장되도록 전자빔음가속기에 대한 열-전기적 및 구조적 해석을 진행하여 음극의 직경, 전력부하, 반사극의 내경, 음극의 열변형최대처짐도에 대한 최적크기를 확정하였다.

직접가열에 의한 가림막식전자가속기는 원기둥형대칭구조를 가지고있다. 그러므로 모형을 1/4로 하여 계산량과 계산시간을 줄이였다. 그다음 열-구조분석항목을 설정하고 가속기에 리용되는 재료들의 특성을 고찰하였다.(표)

우선 요소분할을 진행할 때 전자빔음가속기의 때 부분품들에 해당한 재료번호들을 준 다음 가열점조와 반사극, 살창극, 양극은 열구조결합형요소인 solid70을 리용하여 요소분할을 하고 측면부분은 solid227을 리용하여 분할하였다.

표. 모의에 리용된 재료들의 성질

재료	밀도 /(kg·m ⁻³)	열전도계수 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	비열 /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	열 복사률	열팽창계수 /K ⁻¹	앙그를 /(N·m ⁻²)	뽕쫑비
W	19 300	115.5	132	0.34	6.1·10 ⁻⁶	3.2·10 ¹¹	0.17
불수강	8 030	53.6	460	0.4	5.6·10 ⁻⁶	2.39·10 ¹¹	0.287
Al ₂ O ₃	3 970	45	600	0.5	4.3·10 ⁻⁶	1.23·10 ⁹	
Al	2 700	237	901.85	0.05	2.3·10 ⁻⁵	6.85·10 ¹⁰	

요소분할한 직접가열에 의한 가림막식전자가속기의 1/4모형은 그림 2와 같다.

경계조건으로서는 우선 음극을 하나의 열원으로 정의하고 1/4로 잘리운 면들을 대칭면으로 설정하였다. 가림막식전자가속기의 매개 부분품들은 밀접히 결합되어있으므로 그것의 접촉열저항은 무시할수 있다. 전자묶음가속기의 내부는 진공이므로 내부에서의 열전달은 주로 열전도와 열복사에 의해 일어나며 외부에서는 대류에 의한 열전달이 일어난다.

그러므로 전자묶음가속기의 내부면들에는 열전도 및 복사와 관련한 경계조건을, 외부면들에는 대류열전달과 관련한 경계조건들을 주었다. 대류열전달계수는 다음의 식으로 결정할수 있다.

$$\alpha = \frac{k}{l} \text{Nu}, \quad \text{Nu} = B(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n, \quad \text{Gr} = \frac{g \Delta T \beta l^3}{\nu^2}, \quad \text{Pr} = \frac{\rho C \nu}{k}$$

여기서 α 는 대류열전달계수, k 는 열전도계수, l 은 모형의 기하학적인 치수, Nu는 누셀트수, Gr는 그라스호프수, Pr는 프란틀수, g 는 중력가속도, ΔT 는 벽과 류체의 온도차, β 는 류체의 체적팽창계수, ν 는 류체의 운동점성계수, C 는 류체의 비열, ρ 는 류체의 밀도이다. 계수 B 와 지수 n 은 $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ 의 값에 따라 결정되는 상수들이다.

이에 기초하여 가열섬조의 길이가 500mm일 때 가열섬조의 직경과 소비전력에 따르는 가림막식전자가속기의 온도분포특성을 모의하였다.

그림 3에 가열섬조의 직경과 소비전력에 따르는 가열섬조와 반사극에서의 온도변화 특성을 보여주었다.

그림 3에서 보는바와 같이 가열섬조에 공급하는 전력을 증가시키면 가속기부분품들의 온도가 올라가며 같은 전력을 공급하는 경우 가열섬조의 직경이 커질수록 음극을 비롯한 부분품들의 온도가 낮아진다는것을 알수 있다.

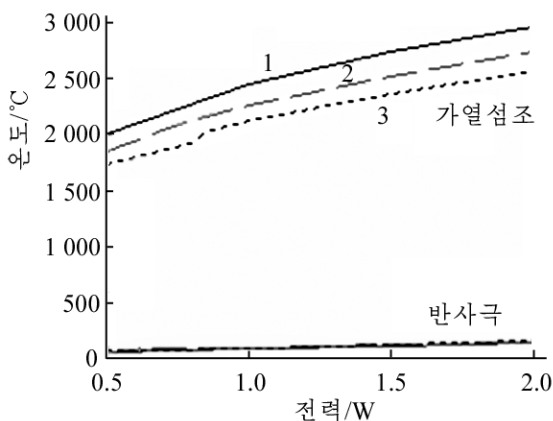


그림 3. 가열섬조의 직경과 소비전력에 따르는 가열섬조와 반사극에서의 온도변화

1-3은 가열섬조직경이 각각 0.6, 0.8, 1.0mm임

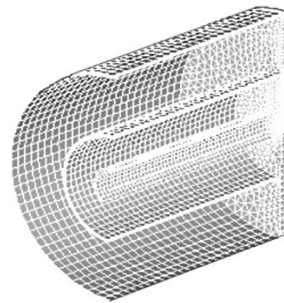


그림 2. 직접가열에 의한 가림막식 전자가속기의 1/4모형

또한 가열섬조에 공급하는 전력을 변화시킬 때 직경이 서로 다른 가열섬조를 가지고있는 전자묶음가속기부분품들의 온도변화는 부분품마다 서로 다르다. 그리고 가열섬조의 경우에는 소비전력이 0.5kW씩 커짐에 따라 온도가 수백°C정도씩 올라가지만 반사극의 온도는 수~수십°C의 범위 내에서 변한다는것을 알수 있다. 살창극과 양극의 온도도 역시 반사극과 마찬가지로 수~수십°C의 범위내에서 변한다.

또한 모의결과를 분석해보면 반사극, 살창극, 양극의 온도가 중심부분보다 양끝 부분들에서 약간 더 높다. 그것은 전자묶음가속기의 양쪽 옆면들의 중심에 높은

온도로 가열된 가열섬조가 접촉하고있는것으로 하여 열전도현상이 세계 일어나며 랑글부분의 복사면들이 다른 부분들에 비하여 보다 가까이 접근해있는것으로 하여 랑글에서 복사효과도 제일 강하게 일어나기때문이다.

직경이 0.6mm인 가열섬조인 경우 그것의 소비전력이 0.5kW일 때 가열섬조의 온도가 2 001℃정도로써 선행연구결과[3]와도 일치한다. 가열섬조의 소비전력은 그것의 직경과 전자묶음가속기의 용도, 용도에 따라 결정되는 전자묶음전류의 크기, 장치의 열력학적인 안정성 등을 고려하여 합리적으로 정해야 한다.

직경이 0.8mm이고 소비전력이 0.7kW인 가열섬조를 설치한 가림막식전자가속기에서 y 축방향에 따르는 가속기내부의 온도변화는 그림 4와 같다.

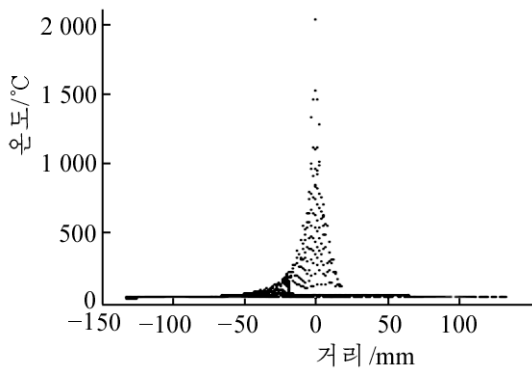


그림 4. 가열섬조의 직경이 0.8mm이고 소비 전력이 0.7kW일 때 y 축방향에 따르는 가속기내부의 온도변화

나타난다. 이것은 열복사가 음극과 반사극사이에서만 강하게 일어나며 기타 부분들에서는 매우 약하게 일어난다는것을 의미한다.

그러므로 전자묶음가속기내부에서의 열복사는 음극과 반사극 그리고 가속기의 랑쪽 측면벽들사이에서 일어나는 복사만 고려해도 된다는것을 알수 있다. 이것은 계산량과 계산시간을 더 줄일수 있게 한다.

가열섬조로부터 반사극까지의 거리에 따르는 반사극의 온도변화는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 가열섬조로부터의 거리가 멀어짐에 따라 반사극의 온도는 내려간다. 거리가 10mm로부터 20mm까지 멀어질 때 반사극의 온도변화범위는 대략 85℃정도이다. 반사극의 내경은 가열에 대한 열력학적인 안정성과 전자묶음의 집초성이 보장되도록 정해야 한다.

다음으로 가열섬조의 온도가 2 000℃일 때 가림막식전자가속기의 열력학적인 변형특

그림 4에서 보는바와 같이 그래프는 음극의 중심을 지나면서 음극축방향에 수직인 자름면에서의 온도변화특성을 나타낸다. 또한 xz 평면위에 놓이는 음극과 반사극사이의 공간에서 온도는 2 036℃로부터 88℃로 급격히 낮아지며 반사극을 지나서부터 양극까지의 공간에서는 30℃의 범위내에서 온도가 완만하게 변한다. 그리고 xz 평면아래에 놓이는 음극과 반사극사이의 공간에서는 온도가 2 036℃로부터 229℃로 내려가며 살창극근방에서 68℃로 된다.

음극의 직경과 소비전력이 다른 경우에도 온도의 차이는 있지만 이러한 특성이 유사하게

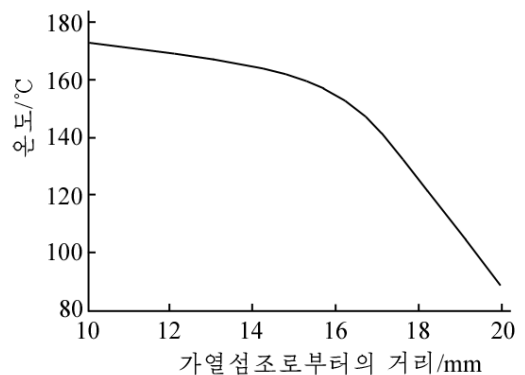


그림 5. 가열섬조로부터 반사극까지의 거리에 따르는 반사극의 온도변화

성을 고찰하였다.

가열섬조를 내놓은 다른 부분품들의 온도는 그리 높지 않으므로 열변형은 매우 작게 일어난다. 가열섬조를 제외한 가속기부분품들에서 열변형으로 인한 변위는 평균적으로 0.001 8mm정도이다. 그러나 가열섬조는 2 000℃의 높은 온도로 가열되기때문에 열변형이 다른 부분들에 비하여 심하게 일어나며 가열섬조가 아래로 늘어지는 처짐현상이 나타난다. 가열섬조의 처짐현상으로 하여 가속기내부에 형성되는 전기마당이 이지러지는데 이것은 전자묶음의 집초와 전자묶음전류의 균일성에 영향을 주며 살창극이나 창문박막에서 국부적인 가열과 그로 인한 파괴와 같은 비정상적인 현상을 가져올수 있다.

그림 6에 가열섬조의 직경과 길이에 따르는 처짐도의 변화특성을 보여주었다.

그림 6에서 보는바와 같이 가열섬조의 직경이 클수록 그리고 길이가 길수록 처짐도는 커진다. 그것은 가열섬조의 직경이 클수록 섬조가 받는 중력이 커지며 또한 가열섬조의 길이가 길수록 보다 큰 길이팽창이 일어나기때문이다.

이로부터 처짐현상과 전자묶음전류의 불균일도가 최소로 되도록 가림막식전자가속기의 구조를 설계해야 한다는것을 알수 있다.

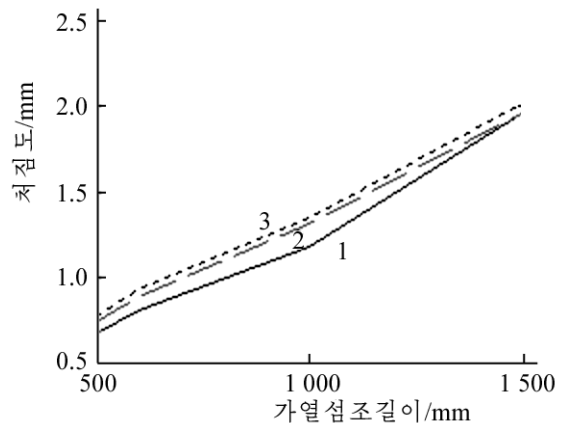


그림 6. 가열섬조의 직경과 길이에
따르는 처짐도변화
1-3은 가열섬조의 직경이 각각
0.6, 0.8, 1.0mm인 경우

맺 는 말

1) 가열섬조의 온도를 2 000℃정도로 보장하자면 직경이 0.6, 0.8, 1.0mm인 가열섬조들에 각각 0.5, 0.65~0.7, 0.8~0.85kW의 전력을 보장해주어야 한다.

2) 반사극은 가열된 가열섬조로부터 가장 큰 열부하를 받으며 그것의 열력학적안정성과 전자묶음의 집초성을 담보하자면 반사극의 내경을 10~20mm범위에서 보장하는것이 좋다.

3) 전자묶음가속기의 가열섬조를 제외한 다른 부분품들의 열변형은 0.001 8mm로서 매우 작지만 가열섬조의 열변형은 그에 비하여 훨씬 크다. 길이가 500mm이고 직경이 0.6, 0.8, 1.0mm인 가열섬조의 경우에 최대처짐도는 각각 0.675, 0.745, 0.779mm이다.

그러므로 가열섬조의 처짐도를 최대한 줄여 전자묶음전류의 불균일도가 최소로 되도록 장치를 설계해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Roger Bryant et al.; Electron-beam Crosslinking Technology, 1, 59, 2013.
- [2] 史戎坚; 电子加速器工业应用导论, 中国质检出版社, 22~25, 2012.
- [3] 陈鹏飞; 高能物理与核物理, 22, 6, 564, 1998.
- [4] 姚列明 等; 电子科技大学学报, 34, 4, 470, 2005.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

Study on the Characteristics of Temperature Distribution and Thermodynamic Distortion of the Electronic Gun

An Myong Jin, U Yong Nam

We were simulated the characteristics of temperature distribution and the property of thermodynamic distortion of some parts in electron gun and the optimized physical parameters were decided by using ANSYS.

Key words: electron curtain accelerator, electronic gun