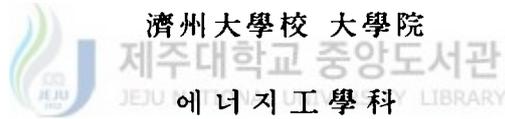
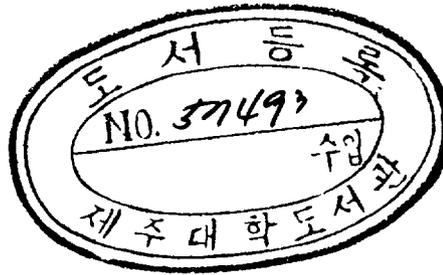


M
F44.1
7 2925

碩士學位論文

Single Cusp 磁場型
水素이온源의 設計 및 製作



金 秀 勳

1996年 12月

Single Cusp 磁場型 水素이온源의 設計 및 製作

指導教授 李憲周

金秀勳

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1996年 12月

金秀勳의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 조경호

委員 이근우

委員 권원기



濟州大學校 大學院

1996年 12月

Design and Fabrication of a Single Cusp Magnetic Field Type Hydrogen Ion Source

Su-Hun Kim

(Supervised by Professor Heon-Ju Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1996. 12.

목 차

summary	1
I. 서론	2
II. 이론 및 설계	4
1. 이온원의 기본개념	4
1) 이온원의 기본구조	4
(1) 이온화도입부	4
(2) 플라즈마생성실	4
(3) 이온인출부	5
(4) 이온빔수송계	5
2) 이온원의 주요물리량	6
(1) 인출전류량	7
(2) 빔발산각	8
2. 양성자이온원	8
1) 플라즈마생성실	8
(1) 수소이온의 생성 및 소멸	9
(2) 전자충돌형 전리방식의 플라즈마발생	13
① 열음극	14

② 아크방전	17
③ 전자가둠	19
④ Possion Group Code	20
⑤ 자석 Holder 및 냉각 자켓	22
2)인출부	23
(1)이온방출면의 형태	23
(2)인출되는 이온전류의 제한치	24
(3)전극축의 불정합에 의한 빔 편향	25
(4)가속-감속전극	27
(5)공간전하효과	28
(6)E-GUN	29
3)진공챔버 및 이온빔전류량 측정기	43
(1)진공챔버	43
(2)Faraday cup	45
4)전원	47
5)이온원 제작	48
III. 결론	54
IV. 참고문헌	55

summary

A single-cusp type hydrogen ion source has been designed and fabricated. In order to increase the efficiency of the plasma production, a single-cusp type magnet circuit and an electrostatic reflector were installed. The Poission Group Code was used to predict the distribution of magnetic field in the plasma chamber. In order to design the accel.-decel. extraction part for forming the ion beam with low emmitance and high current density, EGUN code was used. The results of calculation show that the configuration of plasma electrode strongly affects the beam quality and the deceleration electrode only functions the repression of the electron stream. When the plasma-accel potential is -20kV and an accel.-decel. potential is 1kV, the calculated extraction current, normalized emittance and perveance are 20.6mA, $1.28 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{rad}$ and $7.87 \times 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{V}^{-3/2}$, respectively. This study on the improvement of beam quality and the achievement of high ion beam current will contribute to the analysis of fusion plasma and the research on the surface physics.

I. 서 론

이온은 전자와 같이 하전입자이므로 용이하게 운동에너지를 제어할 수 있다. 더구나 이온은 원소 각각의 성질을 갖고 있으며 화학적으로 활성상태일 때 다른 물질과 상호작용한다는 점에서 그 이용가치는 높다. 공학적으로 이온원에서 이용되는 원소는 주기율표상에 나타난 원소 대부분이고 주요 이용 에너지영역은 화학에너지에 해당하는 수eV부터 고체속으로 주입하기 위해 필요한 수100eV까지이다. 이온원의 역사를 살펴보면, 1930년대에 원자핵실험 분야에서 Cockroft와 Walton에 의해 개발된 양극선형이온원에서 약1 μ A의 수소이온빔을 얻었다. 그 후 가속기분야에서 수소와 헬륨같은 질량이 가벼운 원소의 이온을 얻어내는 것을 목표로 고주파방전형, PIG형, DuoPlasmatron 등의 이온원이 개발, 이용되어왔다. 또한 그 당시 원자로부터 다수의 전자를 전리시켜 원자핵에 가까운 이온을 얻기 위한 다가이온원인 열음극형 PIG이 개발되었다 (石川順三,1986). 1950년대에는 이온을 응용한 새로운 공학분야가 많이 생겼다. 대표적인 예를 들면, 우주기술에서 이온로켓, 핵융합기술에서 플라즈마가열방법중의 하나인 중성입자입사가열, 그리고 이온과 고체의 상호작용의 응용분야인 이온주입기술 등이 있다. 이후 질량분석기로써 유명한 열음극-PIG형인 Calutron이온원이 개발되었고, 이후 더욱 개량되어 Freeman형의 금속이온원이 개발되었다. 그리고 전자진동형인 Nielsen형이온원, 전자충돌형인 Hollow cathode형이온원은 소형이온원으로써 초기의 이온주입장치에 이용되었다. 또한 이온 plating, 결정성장, 의학분야등 이온원의 이용분야

는 해마다 늘어나고 있고, 과거와는 달리 이온원의 질이 바로 주시스템의 성능을 좌우하게 되는 경우가 많아지고 있다.

본 연구에서는 이렇게 광범위한 분야에서 이용되고있는 이온원의 특성을 조사하기 위해 Sigle Cusp자장형, 필라멘트 열음극 전자총돌형, 가속-감속인출계 그리고 반사기 첨가 수소이온원을 설계, 제작하였다.



II. 이론 및 설계

1. 이온원의 기본개념

1) 이온원의 기본구조

이온원의 구조를 기능별로 구분하면 이온화물질 도입부, 플라즈마생성실, 이온 인출부로 나누어진다. 이들의 기능들을 간략히 설명한다면 다음과 같다.



(1) 이온화도입부

이온화도입부는 희망하는 물질을 플라즈마생성실에서 전리되기 쉬운 상태로 도입시키는 기능을 수행하는 곳이다. 물질은 상온에서 기체상태인 것이 있는가 하면 금속과 같은 고체상태도 있고, 휘유기체와 같은 화학적으로 불활성기체가 있으면 알카리금속과 같은 활성물질도 있다. 이와 같이 효율적인 이온화도입부를 설계하고자 하면 희망하는 물질의 성질을 충분히 파악해야 한다.

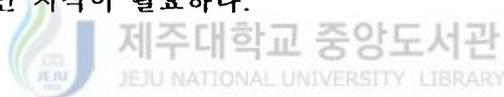
(2) 플라즈마생성실

플라즈마생성실에서는 도입된 물질을 효율 있게 전리시켜 이온이 인출될 수 있을 만큼의 고밀도 플라즈마를 발생시키는 곳이다. 플라즈마생성실을 설계하려면 필라멘트에서 발생된 전자에 의한 충돌전리 또는 금속표면효과에 의

한 전리 등의 여러 가지 전리방법과 글로우방전, 아크방전등의 방전지식이 필요하고 입자들의 각종반응과 전자장내의 하전입자운동등의 광범위한 지식이 필요하다.

(3) 이온인출부

이온인출부는 전계를 이용하여 이온에 충분한 운동에너지를 전달하여 특정한 방향성을 지닌 이온빔을 발생시키는 곳이다. 원하는 이온빔을 인출하기 위해서는 공간전하효과의 완화기술, 전자의 역전류 방지기술, 이온원에 관련된 물리량과 이온방출면 형태의 상호관계 등 전계내에서 운동하고 있는 하전입자의 포괄적인 지식이 필요하다.



(4) 이온빔수송계

이온빔수송계는 이온원에 속한 부분은 아니지만 공간전하 효과에 의한 빔발산의 억제와 이온빔의 전류량 유지 등 인출시의 이온빔의 특성을 유지시키기 위한 장치로 이온빔을 장거리 수송할 때 필요하다. 이온빔수송계를 설계하려면 전자계 렌즈의 물리적 지식이 필요하다.

본 연구에서 제작하는 이온원의 이온종류는 양성자이므로 원료물질은 수소기체를 이용하였다. 수소기체는 알카리족에 속하는 원소이므로 이미 전리되기 쉬운 상태이다. 그러므로 이온화도입부 필요 없이 직접 플라즈마생성실에 원료물질을 도입할 수 있다. Fig.1은 양성자 이온원의 구조와 이온빔을 인출하기 위해 필요한 요소들을 간략히 도식화하였다.

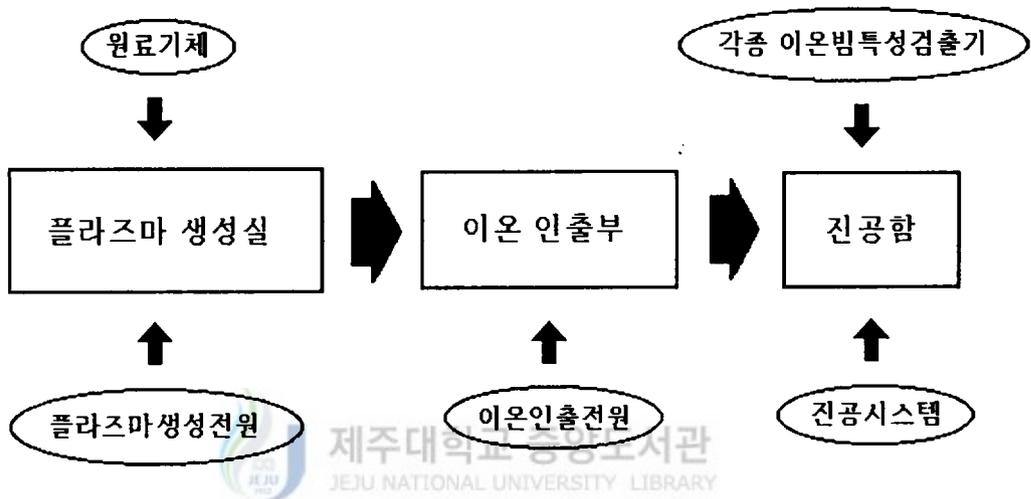


Fig. 1. Schematic block diagram of hydrogen ion source

2) 이온원의 주요물리량

이온원의 효율을 평가하는데 척도로 이용되는 물리량은 인출전류량과 이온빔의 에미턴스이다. 본 연구에서는 빔에미턴스를 직접 측정하는 대신, 빔에미턴스와 밀접한 관계를 갖는 물리량인 이온빔의 발산각을 분석하였다. 다음은 이들 이온원의 주요물리량 두 가지에 대해 간략히 소개하겠다.

(1) 인출전류량

이온인출부에서 얻을 수 있는 전류량은 공간전하효과에 의해 제한되어진다.

$$I_{si} \cong 4.3 \times 10^{-8} \left(\frac{2a}{d}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{M}\right)^{1/2} \cdot V^{3/2} \cdot \gamma \quad (1)$$

I_{si} : 인출전류량 [A] a : 인출구의 반경 [cm]

d : 플라즈마전극과 인출전극(가속전극)간의 거리 [cm]

M : 이온 질량수 V : 인출전압 [V]

γ : 공간전하제한 완화계수



여기서 γ 는 인출영역에 전자원을 이용한 공간전하중화가 있을 경우 공간전하제한 전류가 완화될 때의 계수로써 1이상의 값을 갖는다. 인출전류량은 공간전하제한에 의해서만 결정되는 것이 아니라 플라즈마생성실에서 이온방출 능력의 한계전류치인 이온포화전류도 동시에 고려해야한다 (Brown,1989).

$$I_{pi} \cong 3.0 \times 10^{-13} \cdot a^2 \cdot \frac{1}{M}^{1/2} \cdot T_e^{1/2} \cdot n_i \quad (2)$$

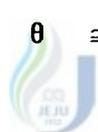
I_{pi} : 이온포화전류 [A] T_e : 플라즈마 전자온도 [eV]

n_i : 플라즈마밀도 [cm^3]

(2) 빔 발산각

빔의 발산각은 에미턴스와 매우 유사한 물리량으로써 빔의 질인 직진도를 측정하는데 이용된다. 2차원 규격화에미턴스와 빔의 발산각은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_2 \cong \frac{1}{\pi} \int \frac{P_x}{P_z} dx \quad (3)$$

$$\theta \cong \frac{\delta}{D} \quad (4)$$


제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

ε_2 : 2차원규격화에미턴스 [m · rad] P_x : 빔의 경방향운동량 [kg · m/sec]
 P_z : 빔의 축방향운동량 [kg · m/sec] θ : 빔의 발산각 [rad]
 δ : 경방향으로 변이된 거리 [m] D : 인출구와 검출판사이의 거리 [m]

2. 양성자 이온원

1) 플라즈마생성실

과거에는 이온빔의 양이 적을 때 대다수는 간단한 글로우방전을 이용해 충분한 플라즈마밀도를 얻을 수 있어 플라즈마생성에 관한 관심은 적은 편이었지만 대전류의 이온빔과 광범위한 균일 고밀도 플라즈마를 얻는 것과 경제적인

로 효율이 좋은 전리방식을 개발하려면 플라즈마 발생에 대한 보다 깊은 관심이 필요하고 바로 이것이 이온원의 성능과 주시스템의 성능을 결정짓게 한다. 본 연구에서 관심대상인 이온은 양성자이므로 이를 중심으로 논하겠다.

(1) 수소이온의 생성 및 소멸

본 연구에서 양성자이온을 생성시키기 위해 수소기체를 원료물질로써 이용되고 있으므로 수소기체의 생성 및 소멸과정의 지식이 매우 중요하다. Table 1은 수소의 충돌과정들을 정리했다. 이들 과정들을 번호순으로 설명하면 다음과 같다.

- (1)수소분자의 해리 (2)수소원자의 전리 (3)수소분자의 전리
 (4)수소분자의 해리성 전리 (5) α 입자의 생성반응 (6)~(8)고속입자간의 반응

여기서 이온원 플라즈마생성실내에서 일어날 수 있는 것은 (1)~(5)이고 (6)~(8)들은 일어나지 않은 반응이므로 이들 과정은 무시할 수 있다. 또한 H_3^+ 의 양도 매우 적으므로 무시할 수 있다. 본 연구에서는 H_2^+ 가 원료기체로써 이용되므로 일정압력(원료기체의 일정유입량)과 플라즈마준중성조건을 이용하면 다음과 같은 관계식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{dn_1^+}{dt} = n_1^0 \langle \sigma_{0 \rightarrow 1}^+ \cdot v_e \rangle n_e + n_2^0 \langle \sigma_{2 \rightarrow 1}^+ \cdot v_e \rangle n_e - \frac{n_1^+}{\tau^+} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dn_2^+}{dt} = n_2^0 \langle \sigma_{2^+ \rightarrow 2^+} \cdot v_e \rangle n_e - n_2^+ \langle \sigma_{2^+ \rightarrow 3^+} \cdot v_+ \rangle n_2^0 - \frac{n_2^+}{\tau^+} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{dn_3^+}{dt} = n_2^+ \langle \sigma_{2^+ \rightarrow 3^+} \cdot v_+ \rangle n_2^0 - \frac{n_3^+}{\tau^+} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_1^0}{dt} = & n_2^0 \langle \sigma_{2^0 \rightarrow 1^0} \cdot v_e \rangle n_e \cdot 2 + n_2^0 \langle \sigma_{2^0 \rightarrow 1^+} \cdot v_e \rangle n_e \\ & + n_2^+ \langle \sigma_{2^+ \rightarrow 3^+} \cdot v_+ \rangle n_2^0 - n_1^0 \langle \sigma_{1^0 \rightarrow 1^+} \cdot v_e \rangle n_e - \frac{n_1^0}{\tau^0} = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

$$n_e = n_1^+ + n_2^+ + n_3^+ \quad (9)$$

$$n_0 = n_1^0 + n_2^0 \quad (10)$$



n_2^0 : H₂ 분자의 입자밀도 n_3^+ : H₃⁺ 이온의 입자 밀도

n_1^0 : H₁ 원자의 입자밀도 n_e : 전자밀도

n_1^+ : H₁⁺ 이온의 입자밀도 v_e : 전자의 속도

n_2^+ : H₂⁺ 이온의 입자밀도 v_+ : 이온 속도

$\sigma_{1^0 \rightarrow 1^+}$: H₁부터 H₁⁺가 생성되는 전리단면적

$\sigma_{2^0 \rightarrow 1^+}$: H₂부터 H₁⁺와 H₁이 생성되는 해리성 전리단면적

$\sigma_{2^0 \rightarrow 2^+}$: H₂부터 H₂⁺가 생성되는 전리단면적

$\sigma_{2^+ \rightarrow 3^+}$: H₂⁺와 H₂부터 H₃⁺가 생성되는 단면적

$\sigma_{2,1}^{0,0}$: H₂부터 2H₁이 생성되는 해리단면적

* 단위 : n [cm³], σ [cm²]

여기서 < >는 전자 또는 이온의 속도분포계수로 적분한 것을 나타낸다.

Table 1. Reactions of hydrogen

No.	반응과정	최대단면적에너지	σ	< σv >
(1)	H ₂ + e → H ₁ + H ₁ + e + 2eV	8.8eV	$\sigma_{2,1}^{0,0}$	A(1)
(1)	H ₂ + e → H ₁ + H ₁ + e + 11eV	11.8eV		
(2)	H ₁ + e → H ₁ ' + 2e	13.5eV	$\sigma_{1,1}^{0,+}$	A(2)
(3)	H ₂ + e → H ₂ ' + 2e	15.6eV	$\sigma_{2,2}^{0,+}$	A(3)
(4)	H ₂ + e → H ₁ + H ₁ ' + 2e	18.0eV	$\sigma_{2,1}^{0,+}$	A(4)
(4)	H ₂ + e → H ₁ + H ₁ ' + 2e + 10eV	28.0eV		
(4)	H ₂ + e → H ₁ + H ₁ ' + 3e + 10eV	46.0eV		
(5)	H ₂ '(slow) + H ₂ (slow) → H ₃ ' + H ₁ + 1.7eV		$\sigma_{2,3}^{+,+}$	A(5)
(6)	H ₃ '(fast) + H ₂ (slow) → H ₁ '(fast) + H ₂ (slow) + H ₂ (slow)	*		
(7)	H ₂ '(fast) + H ₂ (slow) → H ₁ ' + H ₁ + H ₂ (slow)	*		
(8)	H ₂ '(fast) + H ₂ (slow) → H ₂ (fast) + H ₂ '(slow)	*		

*표에 해당하는 반응과정은 1keV이상에서 일어난다.

식(5)~(10)을 적절하게 정리하면 원자상이온과 분자상이온의 성분비를 구할 수 있다.

$$\frac{n_1^+}{n_2^+} = \left(1 + \frac{n_3^+}{n_2^+}\right) \left\{ \frac{A(4)}{A(3)} + \left(\frac{n_1^0}{n_2^0}\right) \left(\frac{A(2)}{A(3)}\right) \right\} \quad (11)$$

A(1)~A(4)는 Table 1에 나타난 단면적의 $\langle\sigma v\rangle$ 값들이다. Fig.2에서 $A(4)/A(3) \ll 1$ 그리고 $A(2)/A(3) \cong 1$ 로 대략화할 수 있으므로 실제 플라즈마 내에서는 n_1^0/n_2^0 이 작은 범위에 속하므로 다음과 같이 표현될 수 있다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\frac{n_1^+}{n_2^+} \cong \left(1 + \frac{n_3^+}{n_2^+}\right) \cdot \frac{n_1^0}{n_2^0} \quad (12)$$

양성자의 생성율을 높이는 것은 이온원의 경제성을 높이는 것과 같다. 이를 위해서는 식(12)에서 알 수 있듯이 수소분자의 해리를 촉진하여 원자상태의 수소의 분할(n_1^0/n_2^0)을 크게 할 필요가 있다. 그것을 위한 방법은 $A(1) = \sigma_{2,1}^{0,0}$ 의 값을 크게 하는 전자에너지분포를 플라즈마생성실내에서 얻는 것과 플라즈마생성실 벽에서 Table 1의 (1)번 반응의 역반응에 의한 수소원자의 소멸을 최대한으로 막는 것들이 있다. 본 연구에서는 이들 두 가지 개선 방안을 모두 이용하기 위해 약10eV정도의 전자들을 내부쪽으로 가두어지도록

Single Cusp형태인 자장분포와 반사기(Reflector)를 이용했다.

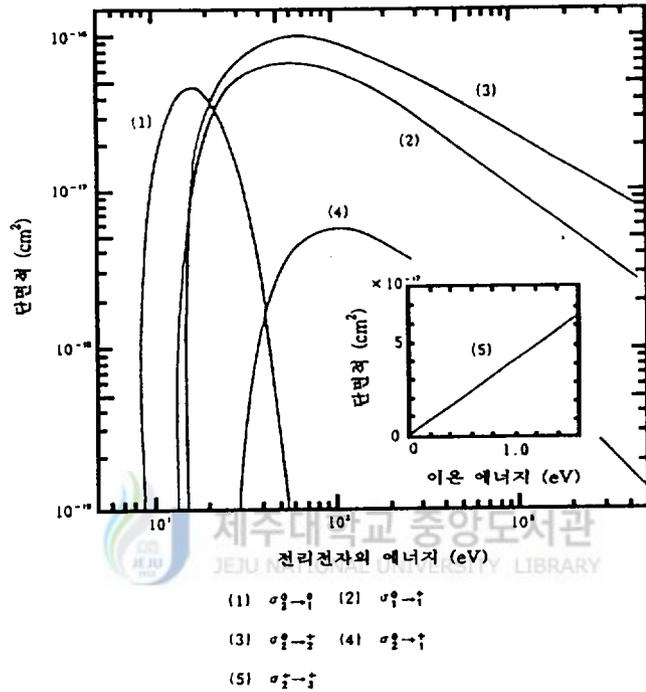


Fig. 2. Interaction cross section of hydrogen

(2) 전자충돌형 전리방식의 플라즈마발생

본 연구에서는 전기효율이 0.95이상이 되는 Kaufman Ion Source에서 이용된 전자충돌형 전리방법을 택했다. 전자 방출형태는 Fig.3과 같이 필라멘트 음극(열음극), Button음극(광전효과방출음극), Hollow음극 등이 있는데 설치가 간편하고 작동을 유지하기 위한 가스유입이 필요 없는 필라멘트가열음극

을 택했다 (Roth,1995).

플라즈마발생원리는 필라멘트에서 전자가 방출하여 양극에 걸려있는 전계에 의해 가속되어 수소기체들을 전리시켜 아크방전을 일으키게 하는 것이다. 다음은 이들 전극들의 재질과 형태에 대해 논하겠다.

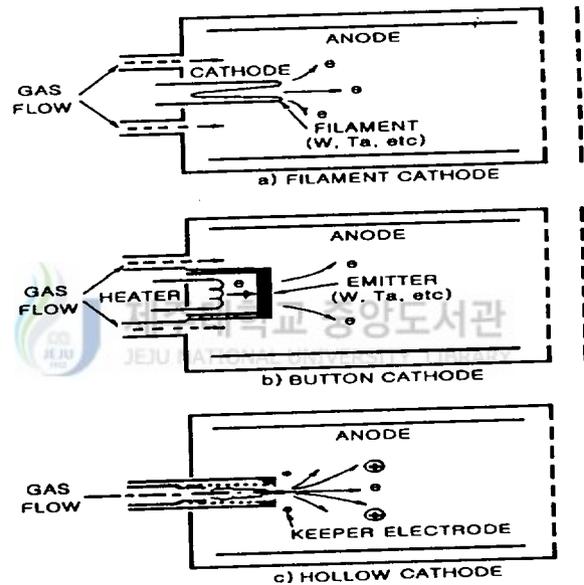


Fig.3. Various cathode configurations for the ion source

① 열음극

음극에서 방출되는 열전자밀도량은 Richardson과 Young이 통계역학을 이용하여 다음과 같은 식을 구했다.

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (13)$$

J : 방출전류밀도 [A/m^2] T : 물질표면온도 [K]

ϕ : 일함수 [V] k : 볼츠만상수 [eV/K]

A : 방출계수 [A/m^2-K^2]

여기서 방출계수 A는 물질에 따라 결정되는 상수인데 각종 재료의 열전자방출계수와 일함수값을 Table 2에 정리했다.

이온원에서 이용되는 열음극은 낮은 온도에서 높은 방출전류밀도를 가지며 긴 수명이 요구된다. Table 3은 열음극에서 이용되는 재료의 동작온도와 그때의 방출전류밀도량을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 필라멘트가 열음극의 단점중의 하나인 짧은 수명을 고려하여 비교적 낮은 온도에서 방출전류밀도량이 큰 1%의 산화토륨이 함유되어 있는 선경 0.75mm인 Thoriated Tungsten을 이용하였다. 필라멘트의 형태는 Fig.4와 같이 전자방출방향은 인출구쪽으로 향하게 했고 플라즈마생성실 중앙에 보다 많은 양성자들을 생성시켜 벽면에서의 수소원자 소멸량을 줄이기 위해 필라멘트를 플라즈마생성실 중앙에 설치했다. 길이 35cm인 필라멘트를 직경 1cm로 10번 감았다.

Table 2. Representative thermionic emission data

재질	A [A/m^2-K^z]	ϕ [V]
Wa	70.0×10^4	4.55
Ta	55.0×10^4	4.25
Ni	30.0×10^4	5.15
Cs	160.0×10^4	2.14
Pt	32.0×10^4	5.65
Cr	48.0×10^4	4.50
Ba on W	1.5×10^4	1.56
Cs on W	3.2×10^4	1.36

Table 3. Emission density at the normal maximum operating temperature of practical cathode

음극 재질	동작 온도 [K]	방출전류밀도 [kA/m^2]
Tungsten	2500	3
Tantalum	2400	8
Rhenium	2400	0.5
ThO ₂ on W or Ir	1900	10
LaB ₆ Bulk	1900	50
Thoriated-Tungsten	1900	10

② 아크방전

본 연구에서 이용된 방전형태는 전자충돌형 방식이므로 이에 해당되는 방전 영역은 Fig.5에서 non-thermal아크방전에 해당된다. Table 4은 non-thermal 아크방전의 플라즈마파라미터들을 보여주고 있고 이들 값들이 이온원에서 요구되는 플라즈마파라미터에 적합하다는 것을 알 수 있다. 글로우방전은 플라즈마밀도가 낮고 플라즈마형성크기가 작아 소전류소형이온원에 적합하고 thermal아크영역은 플라즈마밀도가 높아 이온방출면의 형태가 불룩하게 되어 직진도가 좋은 즉, 발산각이 적은 빔을 형성하기 어렵게 된다. 아크전극은 용점이 높은 내열재 몰리브덴판을 이용하여 Fig.4 처럼 설계, 제작하였다.

Table 4. Plasma parameter of non-thermal arc (low intensity)

Plasma parameter	Non-thermal arc
Electron density, n_e [electron/m]	$10^{20} < n_e < 10^{21}$
Gas pressure, p [Pa]	$0.1 < p < 10$
Electron temperature, T_e [eV]	$0.2 < T_e < 2.0$
Gas temperature, T_g [eV]	$0.025 < T_g < 0.5$
Arc current, I [A]	$1 < I < 50$
Typical cathode emission	Thermionic
Luminous intensity	Bright
Transparency	Transparent
Ionization fraction	Indeterminate
Radiation output	Indeterminate

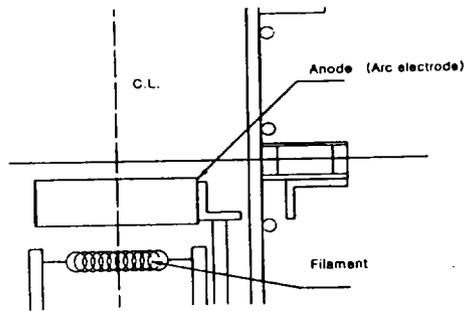


Fig. 4. Schematics of filament and arc electrode

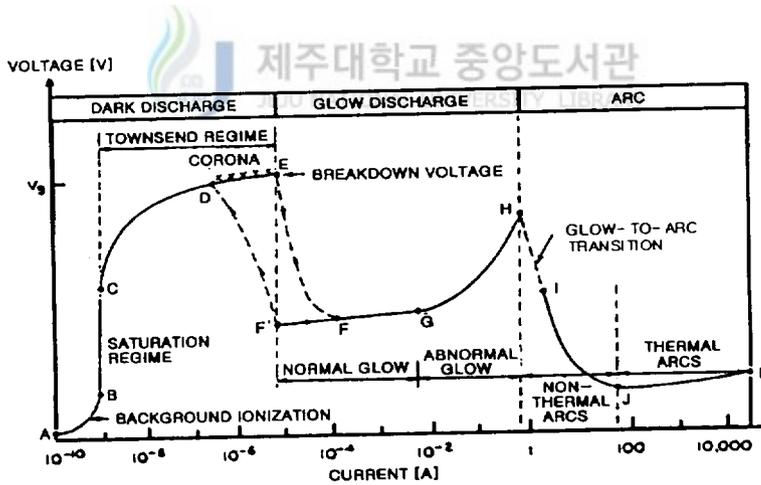


Fig. 5. Universal voltage-current characteristic of the DC electrical discharge

③ 전자가둠

이미 언급했듯이 전자충돌형전리를 이용한 플라즈마 발생에서는 플라즈마 밀도가 식(14)같은 비례관계식을 갖게 되므로 전자빔에 관계되는 양인 $\sigma(E_b)$, v_b , n_b 의 값들을 높히는게 바람직하다. 이를 수행하기 위해서 높은 에너지를 갖은 전자의 방출량을 크게 하여야 한다. 하지만 필라멘트가열음극인 경우 고에너지 전자방출능력의 한계가 있고 만약 다른 방식의 전자방출을 택해도 전력소비량이 급격히 증가하여 이온원의 경제성이 떨어진다. 플라즈마 밀도와 이온원의 경제성을 동시에 향상시키기 위해 방출된 전자를 효율 있게 가둬 전리율(전기효율)을 높이는 방법을 이용해야한다. 본 연구에서는 이를 수행하기 위해 Single Cusp형태의 자장회로와 용점이 비교적 높은(2617℃) Mo으로 제작한 반사기(Reflector)를 이용했다.

이온원에서 발생된 전자들은 가둘 때 주로 전계와 자계를 이용하는데 본 연구에서 관련된 자계를 이용한 전자 가둠방식의 대표적인 것을 소개하겠다.

a) Multipolar magnet형태 : 여러개의 영구자석을 이용하여 벽으로 향하는 전자 들을 자장거울효과에 의해 중앙으로 밀집시켜 중앙에 균일한 플라즈마를 형성시키게 하는 형태이다.

b) Uniform field형태 : 방전축과 평행하게 자장을 걸어 원통형플라즈마를 형성하여 단공인출 이온원에 주로 이용된다.

c) Single Cusp형태 : a)와 b)의 특징을 모두 가진 자장형태로써 중앙에 강한 자장이 형성하여 플라즈마(이온과 전자)를 가두는 것과 동시에 인출부에서는 이온이 자유롭게 운동되고 전자만 가둘 수 있는 자장형태이다. 본 연구에

서는 Single Cusp형태의 자장분포를 예측하기 위해 Poission Group Code를 이용하였고 이를 토대로 플라즈마생성실을 설계하였다.

④ Poission Group Code

Poission Group Code는 Los Alamos National Laboratory에서 20년전부터 개발해온 프로그램으로써 각종자장분포와 전장분포까지 예측할 수 있다 (Menzel,1987). 본 연구에서는 영구자석을 이용하여 Single Cusp형태의 자장분포를 형성하였기 때문에 필요한 프로그램은 다음과 같다.

- a) Automesh : 입력파일을 받아 Logical mesh파일(TAPE73파일)을 형성하는 프로그램으로써 mesh의 크기는 사용자에게 위해 조절할 수 있다.
- b) LATTICE : Logical mesh파일의 데이터를 받아 Physical mesh파일(불규칙한 삼각mesh 형성파일)을 만드는 프로그램이다.
- c) PANDRIA : 영구자석에 대한 2차원의 Maxwell 정전 방정식들을 푸는 프로그램이다.

Fig.6은 Poission Group Code에서 출력된 자장형태이고 Table 5는 이온 방출 부근과 영구자석이 위치한 반경축의 자장세기의 값들이다. 이를 토대로 플라즈마생성실의 길이를 Flange의 길이를 동시에 고려하여 20cm로 설계했다.

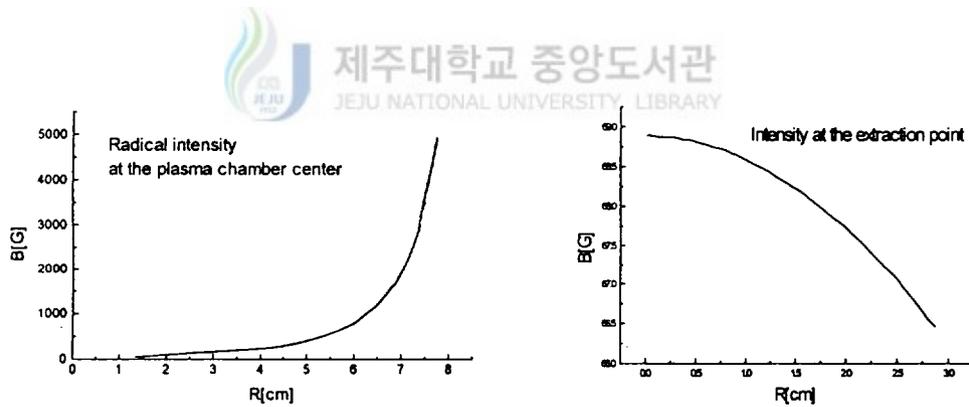
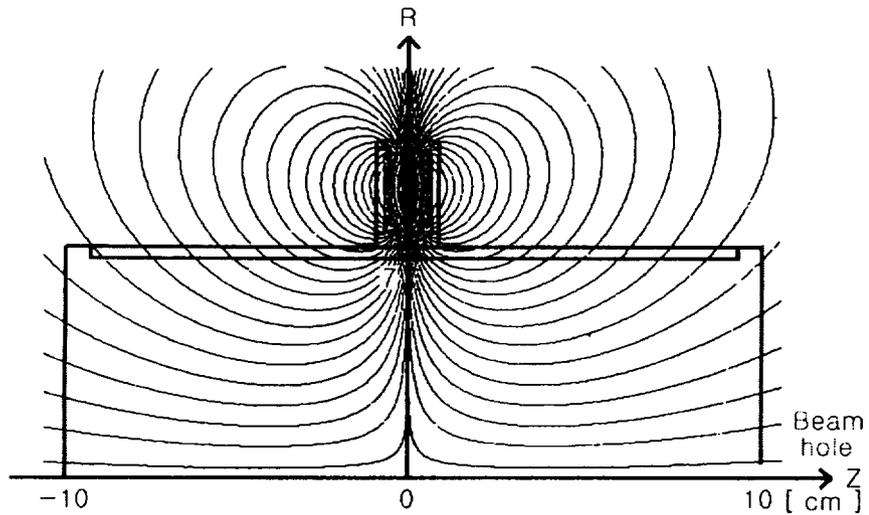


Fig. 6. Magnetic field lines and field intensity generated by the single cusp configuration calculated with PANDIRA CODE

⑤ 자석 Holder 및 냉각 자켓

25×20×15mm 인 영구자석 24개를 이용하여 Single Cusp형태인 자장회로와 균일한 자장을 얻기 위해 Fig.7과 같은 24각형 자석 Holder를 제작하였다. 재질은 강자성체인 연강을 이용했고 이온원의 분리가 가능하도록 반으로 절단했다. 영구자석의 종류는 ND-FE-B자석이고 Br은 약11kG이고 Hc는 약 10kOe이다. Curie온도는 320°C이지만 실제150°C이상되면 영구자석의 자성 변화가 일어나 플라즈마생성실내의 전자가둠에 큰 영향을 미치게된다 (Kraus,1992). 이를 방지하기 위해서 자석부근에 냉각자켓을 설치했다. 냉각자켓의 형태는 U자형냉각방식을 이용했고 재질은 열전달율이 좋은 구리를 택했다. 구리관의 직경은 6.4mm이고 구리판의 두께는 0.4mm이다.

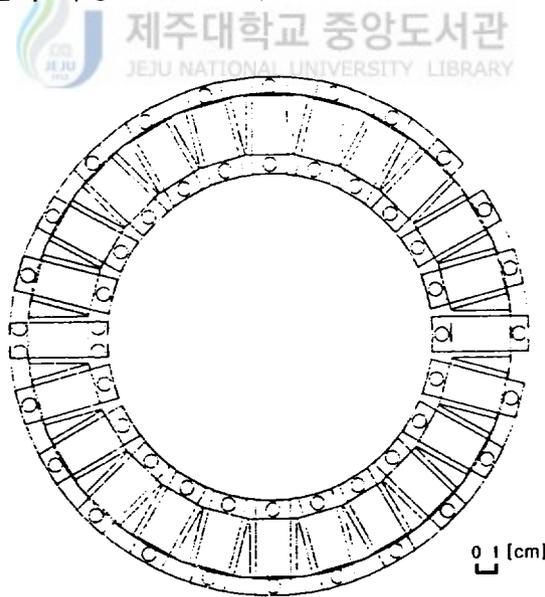


Fig. 7. Diagram of magnetic holder

2) 인출부

(1) 이온방출면의 형태

이온방출면의 형태는 이온 sheath거리와 전극간 거리의 관계에서 변화한다. 이들의 관계를 분석하기 위해 먼저 2차원 모델을 이용하여 이온 sheath거리를 구해야한다. 이온 sheath거리는 이온포화전류밀도와 공간전하제한전류밀도에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_s = 7.6 \times 10^2 \frac{V^{3/4}}{n_i^{1/2} (Z T_e)^{1/4}} \quad (14)$$



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

d_s : 이온 sheath거리 [cm]

Z : 원자번호

식(14)에서 이온 sheath거리는 인출전압에 비례하고 플라즈마밀도에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 여기서 이들 플라즈마 파라미터인 인출전압과 플라즈마 밀도가 이온방출면 형태에 미치는 영향을 다음과 같은 조건에서 대략적으로 도식화하면 Fig.8과 같다 (Septier,1967).

i) 밀도 변화 $n_0 < n_1 < n_2$: (a), (b), (c)

ii) 인출전압 변화 $0 < V_1 < V_2$: (a'), (b'), (c')

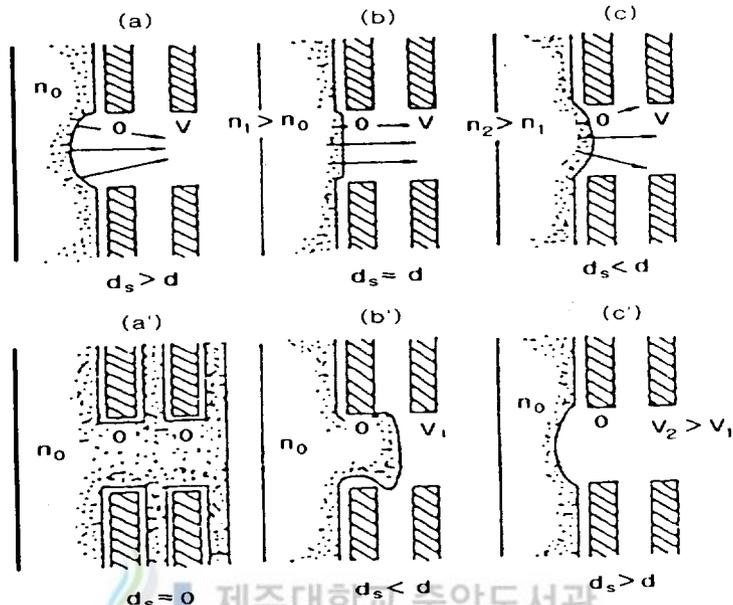


Fig. 8. Variation of the shape of the ion emission surface

(2) 인출되는 이온전류의 제한치

단공부터 인출되는 최대이온전류는 이상적인 경우 식(1)에 나타내주듯이 인출전압의 3/2승에 비례하여 증가되지만 실제 이온원의 특징을 제약하는 조건들이 있다. 이들의 상한치를 나열하면 다음과 같다.

① 전극간거리에 대한 절연파괴 전압의 존재

10^{-4} Torr이하의 진공도에서 전극간거리 d_g 에 대한 절연파괴 전압 V_b 를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_b = 6 \times 10^4 \cdot d_g^{1/2} \quad [\text{V}] \quad (15)$$

② 전극의 열부하의 상한 존재

③ 인출전극들의 이온인출계의 구성성분의 기계적 강도에 대한 제한 존재

②, ③의 제약에 의해 전극에 유한한 두께가 존재하여 식(1)의 d 는 $d_0 + d_g$ 로 바꿀 필요가 있다. 이들의 제약을 도입하여 이온전류의 상한을 계산하면 다음과 같다. (단, aspect 비($2a/d$)는 1이다.)

$$\begin{aligned} I_i &\cong 6.3 \times 10^{-1} \left(\frac{Z}{M}\right)^{1/2} \cdot d_g^{3/4} \\ &= 4.3 \times 10^{-8} \left(\frac{Z}{M}\right)^{1/2} \cdot V_b^{3/2} \quad [\text{A}] \end{aligned} \quad (16)$$

(3) 전극축의 불정합에 의한 빔 편향

전극축의 불정합은 이온빔의 편향을 일으켜 빔의 발산각을 증가시킨다. Fig.9의 a)는 슬릿과 단공인출전극형태에 대한 이론적인 불정합에 따른 편향각을 나타낸 것인데 인출극의 형태에 따라 이들의 관계가 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 단공인출전극형태임으로 단공인출전극에 대해서만 논하겠다.

이온인출전극에 의해 빔이 인출된 후의 빔 발산각은 다음 식과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\omega = \frac{1}{4} \cdot \frac{2a}{d} \left| 1 - \frac{5}{3} \frac{P}{P_c} \right| \quad (17)$$

$$P = I_i / V^{3/2}$$

ω : 빔 편향각 [rad]

P : 실제 이용되는 인출계에서의 퍼비언스 [$A \cdot V^{3/2}$]

P_c : 평행평판전극인출계로 가정했을 때의 퍼비언스 [$A \cdot V^{3/2}$]

I_i : 인출이온빔전류량 V : 인출전극 인가전압

여기서 편향각이 인출전극aspect비와 퍼비언스비에 관계되는 것을 알 수 있다. 이들의 관계를 Fig.9의 b)에 나타냈다.

본 연구에서는 이러한 불정합에 따른 편향각을 억제하기 위해 인출전극구멍을 통일시켜 제작시 인출구에 해당하는 직경6mm인 철봉을 이용하여 접촉시켰고, 인출전극aspect비는 거의 1정도(12/11)로 조절하여 설계했다.

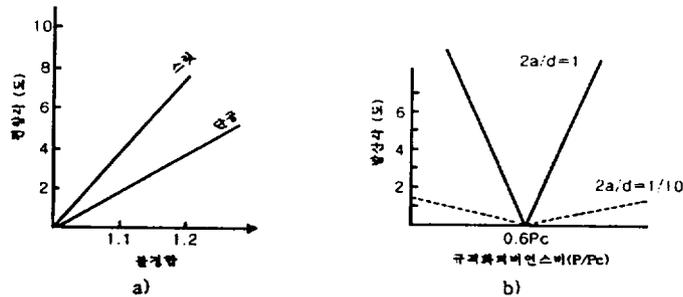


Fig. 9. a) Relation of incorrectionness and deflection

b) Relation of normalized perveance and divergence

(4) 가속감속전극

플라즈마부터 정이온을 인출전극으로 인출하는 경우 인출전극의 후방영역은 인출구멍부터의 중성입자의 방출 때문에 진공도가 다소 양호하지 않으므로 이온과 중성입자의 충돌에 의해 전리가 생겨 저속의 이온과 전자가 생성된다. 생성된 이온은 이온빔의 공간전하에 의해 생기는 외향전계 때문에 외부로 밀려가지만 전자는 그의 전계에 의해 이온빔내부로 흘러들게 된다. 이렇게 인출전극부근에서 존재하는 저속전자들은 인출전계에 의해 이온의 역방향으로 가속되어 플라즈마내로 입사하여 플라즈마 생성전극 아니면 플라즈마전극(방출전극)을 고온화하여 이온원의 안정 동작에 중대한 영향을 미치게 된다. 특히 전자역류는 대전류 이온원에서 보다 큰 영향을 미치기 때문에 더욱 조심해야 한다 (Humphries,1990). 이러한 전자역류를 방지하기 위해 Fig.10에서 나타나듯이 인출전극(가속전극) 오른쪽에 부전위의 전극(감속전극)을 설치하였다. 이러한 전극계를 가속-감속전극계라 한다.

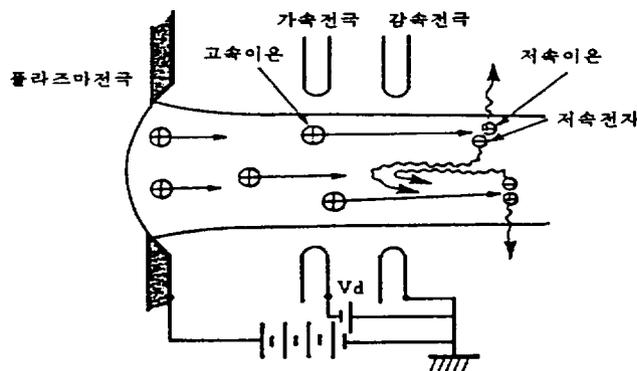


Fig.10. Accel-decel electrode

감속전극의 전위는 저속전자의 에너지이상이면 충분하므로 실효적인 전자에 대한 장벽전위로써 수10~수100V를 만들기 위해 1~2kV의 전위를 인가하면 된다. 이 정도의 감속전위는 가속전위에 비해 충분히 작으므로 이온빔의 광학계의 변화는 무시할 수 있다.

(5)공간전하효과

이온빔은 같은 전하로 지닌 하전입자의 흐름이므로 이온빔내에서는 상호 쿨롱력이 작용하여 공간전하효과가 생긴다. 이러한 효과량은 전하입자들의 속도에 반비례한다 (Chen,1984).

$$n = \frac{I}{qv} = \frac{I}{\sqrt{2} q^3} \sqrt{\frac{m}{V}} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (18)$$

위식에서부터 알 수 있듯이 속도가 작을 경우, 즉 전압이 작거나 질량이 클 경우 공간전하량은 유난히 커진다. 동일 전압인 경우 이온의 공간전하는 전자의 40~400배정도가 되어 이온의 운동에 상당한 영향을 미친다. 플라즈마부터 이온을 인출하는 이온원인 경우 이온인출계의 플라즈마형성면 부근에는 특히 이온의 속도가 작아서 공간전하의 영향에 따라 인출되는 이온전류가 제한된다. 또한 빔으로 형성된 이온류인 경우 상호쿨롱 척력에 의해 빔의 형태가 흐트러진다. 그래서 이온인출계에 대한 이온의 공간전하의 영향을 크게 다음과 같이 분류될 수 있다.

① 경방향의 공간전하력에 따른 이온빔의 발산

② 축방향의 공간전하효과에 따른 인출되는 이온전류의 공간전하제한

③ 이온방출면의 형태

①과 ③의 영향은 이온빔의 질에 관계되고 ②의 영향은 이온전류의 양과 관계된다.

(6) E-GUN (Hermannsfeldt,1988)

SLAC(Standford Linear Accelerator Center)에서 W.B.Hermannsfeldt에 의해 개발된 E-GUN은 정전장, 정자장에서 공간전하효과와 유도자장을 고려한 하전입자들의 궤적을 계산하기 위해 설계되었다. 이 프로그램의 특징을 나열하면 다음과 같다.

① 직각좌표계와 원통좌표계에서 Fig.11처럼 U방향에 대해 동일한 분포를 갖는다는 가정하에서 2차원의 계산을 수행할 수 있다.

② 사용자가 원하는 음극형태에서 Child's law조건에 따라 빔이 인출할 수 있다.

③ 외부에서 주어지는 자장과 빔의 전류에 의해 유도되는 자장의 영향을 고려할 수 있다.

④ 공간전하효과가 고려되는 경우와 공간전하중화를 이용하여 공간전하효과를 억제한 경우 모두 계산할 수 있다.

⑤ Poission's Equation Solver가 있어 경계조건부터 유도된 미분방정식을 이용하여 정전장을 계산할 수 있다.

⑥ 빔전류와 밀도 분포 그리고 발산각의 분포도를 출력할 수 있다.

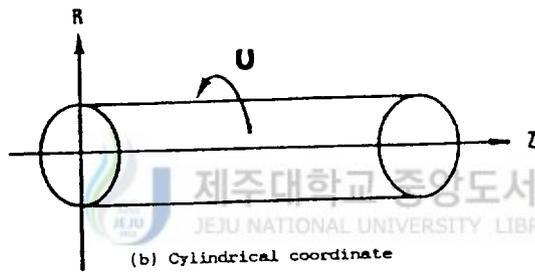
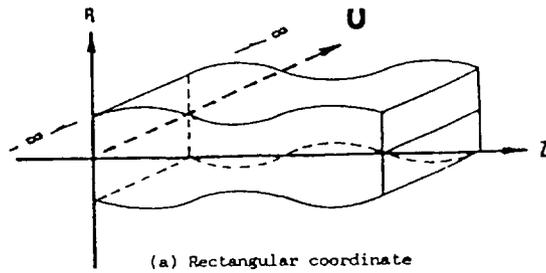


Fig. 11. Two dimensional calculation model

본 연구에서는 이러한 Code를 이용하여 직진도가 좋은 인출전극을 설계하였다.

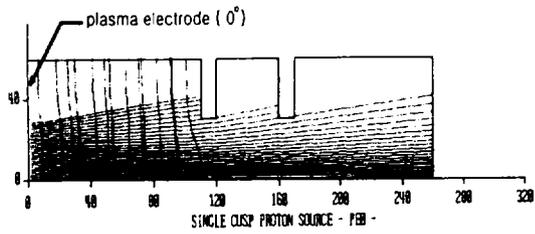
본 연구에서 이용될 인출전극 형태는 가속-감속 전극이므로 플라즈마 전극, 가속전극, 감속전극 등 3개의 전극이 있다. 이들 인출전극의 적합한 설계를 위해 다음과 같이 구분하여 결과를 검토했다.

- ① 플라즈마전극 i) 각도 변화 a) 0°, b) 44°, c) 45°, d) 46°
 ii) 내경 변화 a) 30 [mm], b) 31 [mm]
 iii) 외경 변화 a) 60 [mm], b) 62 [mm]
- ② 가속전극 i) 각도 변화 a) 0°, b) 40°
 ii) 위치 변화 a) 11 [mm], b) 12 [mm]
- ③ 감속전극 i) 각도 변화 a) 0°, b) 60°
 ii) 위치 변화 a) 16 [mm], b) 17 [mm]
- ④ 자계의 영향 i) 유무 a) 유, b) 무

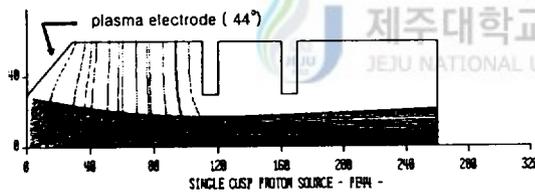
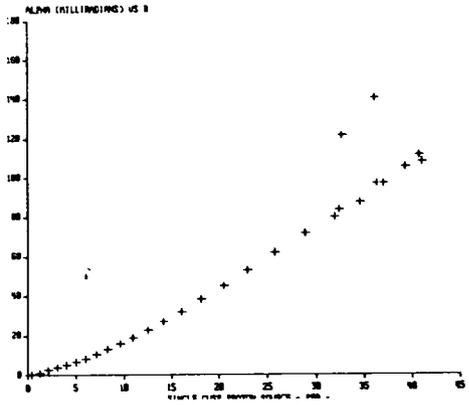
여기서 ④의 자장값은 Poission Group Code에서 출력된 것을 입력하였다.

이들의 빔형태와 발산각은 Fig.12에 나타내었고, Fig.13은 최적화된 인출전극형태때의 빔 발생형태와 이온방출반경에 대한 빔전류밀도량과 발산각을 나타냈고 이들의 결과들을 Table 6에 정리하였다.

Fig.14에는 상기 계산결과를 고려하여 최적화된 형태로 설계된 인출전극부를 보인다. 가속전극의 편향각은 45°이고 전자의 후방입사를 막기위한 감속전극은 편향각이 60°가 되도록 설계하였다. 각 전극간에 알루미늄절연체를 놓았고 절연과피를 억제하기 위해 전극간의 거리를 멀어지게 설계했다.



a) 0°



b) 44°

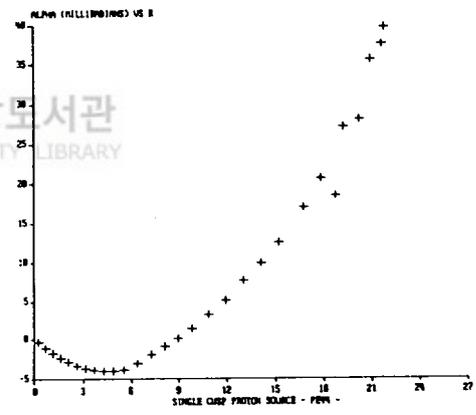
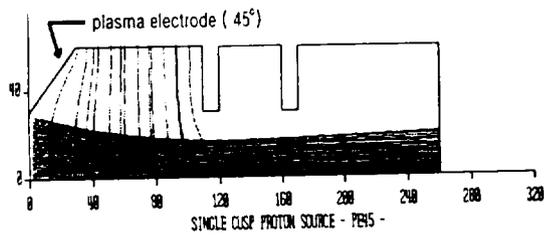
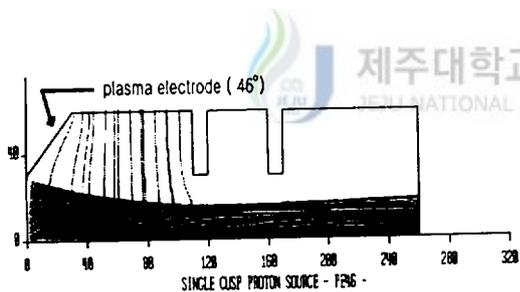
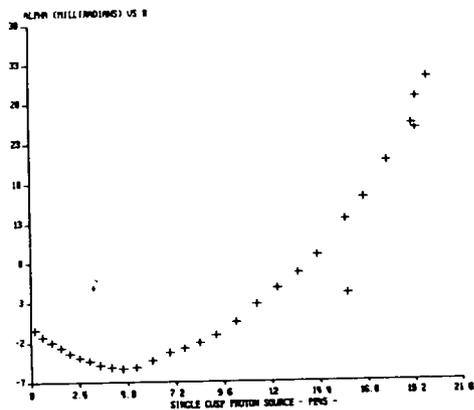


Fig. 12-1. Beam formation and divergence for
the different plasma electrode angle (continued)



c) 45°



d) 46°

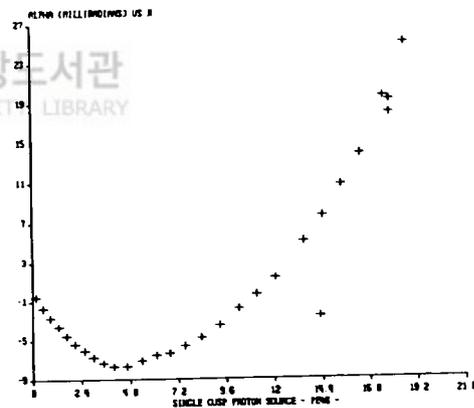
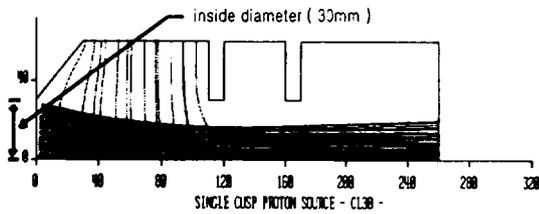
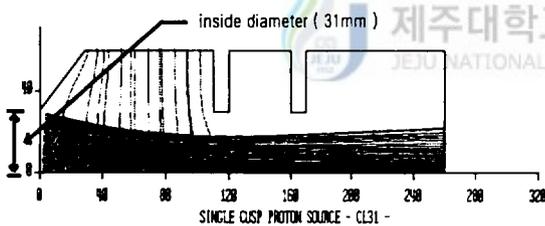
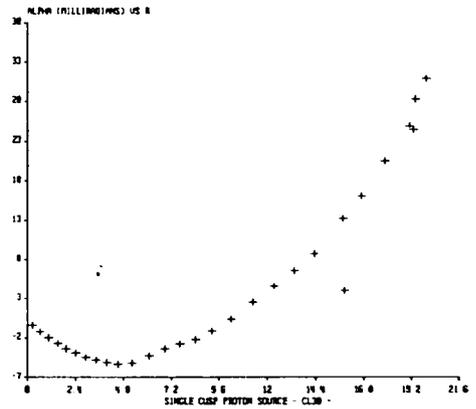


Fig. 12-1. Beam formation and divergence for
the different plasma electrode angle (continued)



a) 30 [mm]



b) 31 [mm]

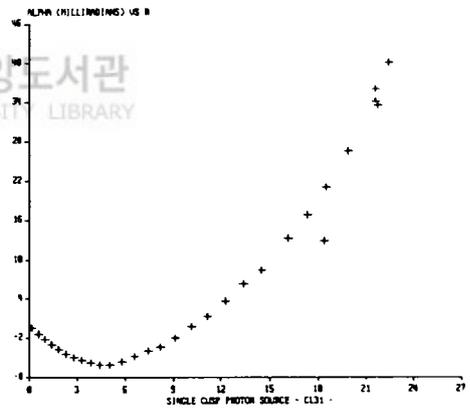
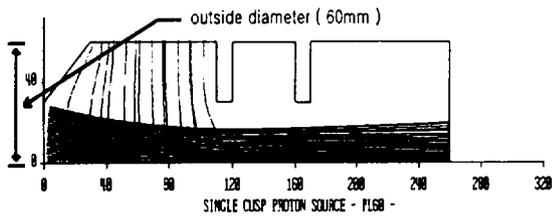
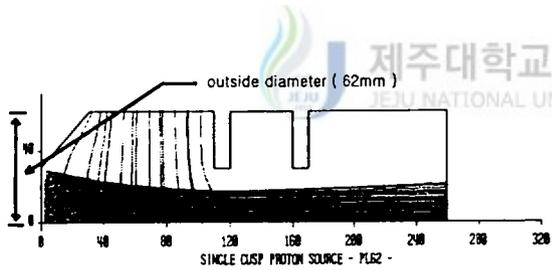
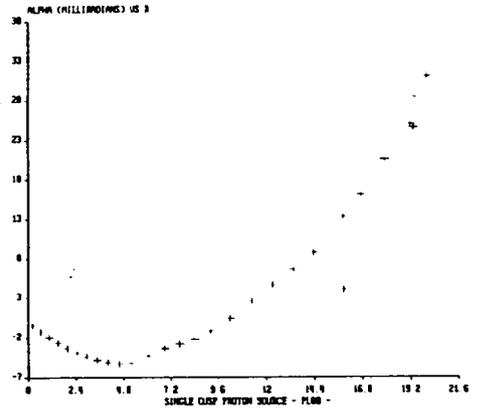


Fig. 12-2. Beam formation and divergence for
the different plasma electrode inside diameter (continued)



a) 60 [mm]



b) 62 [mm]

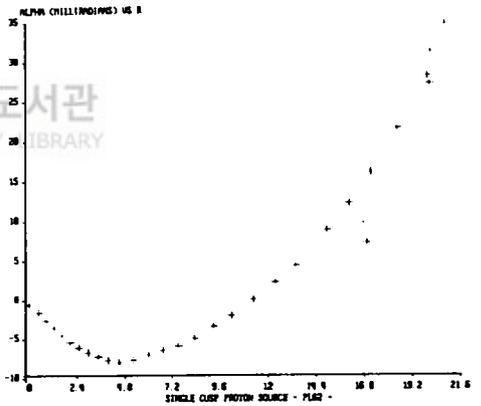
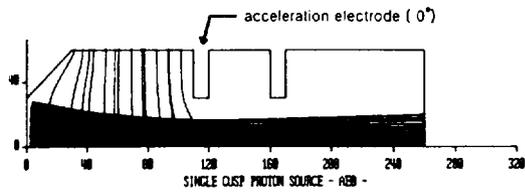
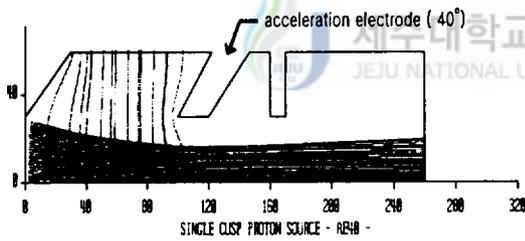
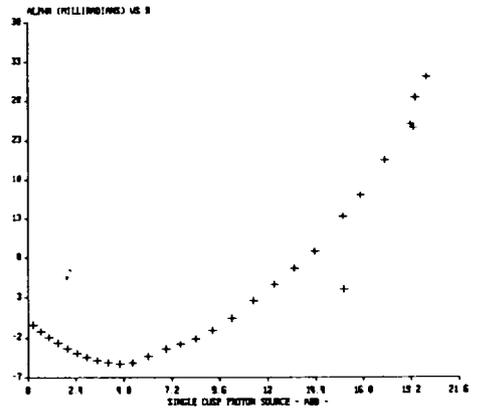


Fig. 12-3. Beam formation and divergence for
the different plasma electrode outside diameter (continued)



a) 0°



b) 40°

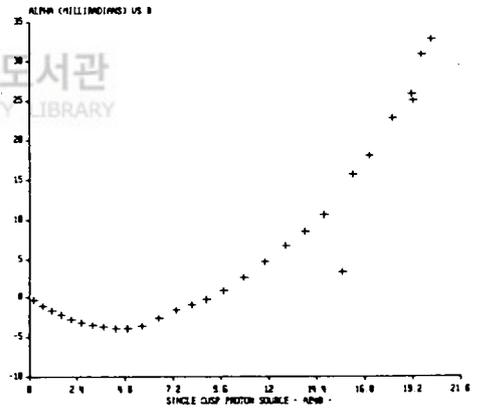
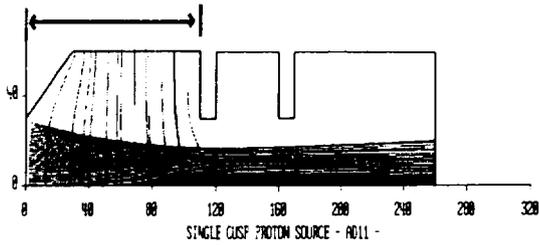
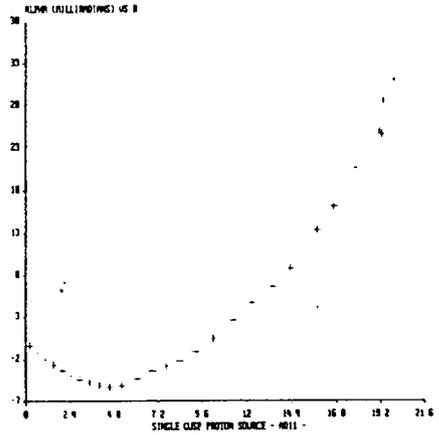


Fig. 12-4. Beam formation and divergence for
the different acceleration electrode angle (continued)

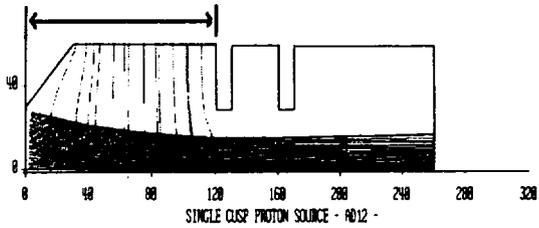
accel. electrode distance (11mm)



a) 11 [mm]



accel. electrode distance (12mm)



b) 12 [mm]

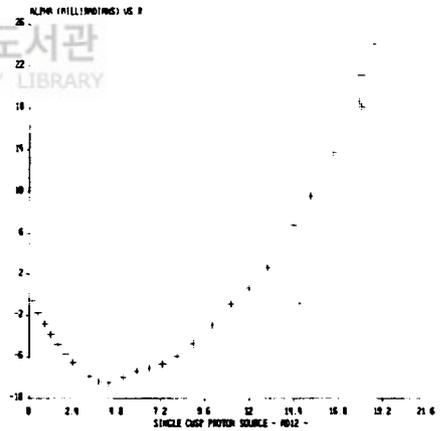
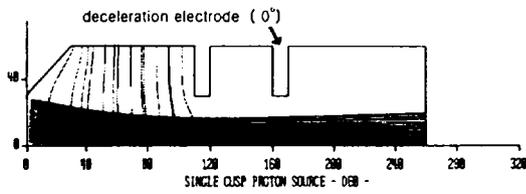
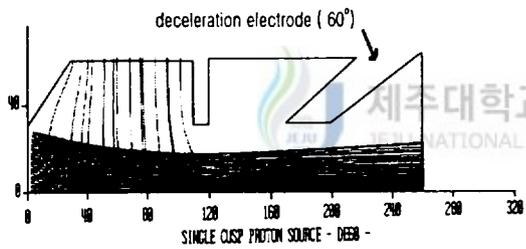
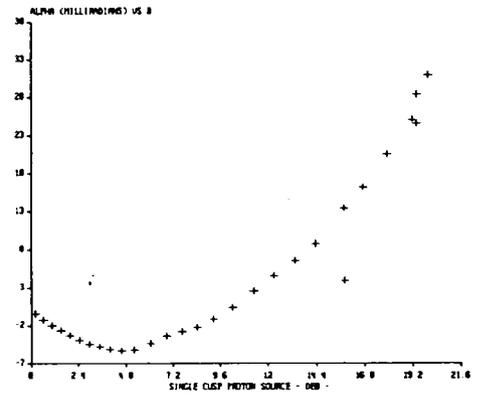


Fig. 12-5. Beam formation and divergence for
the different acceleration electrode distance (continued)



a) 0°



b) 60°

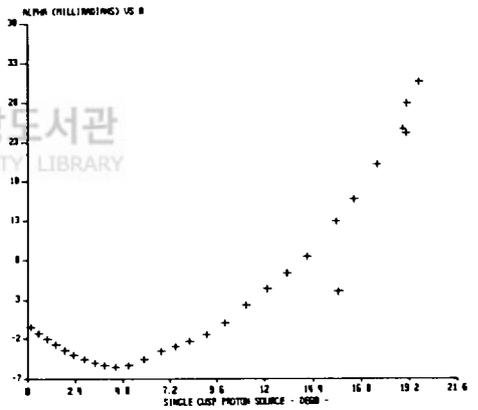
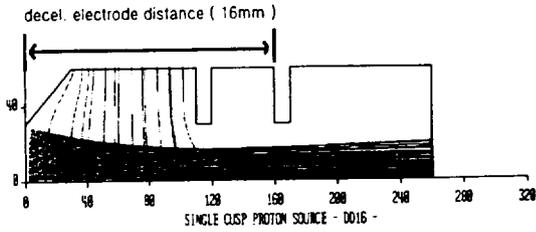
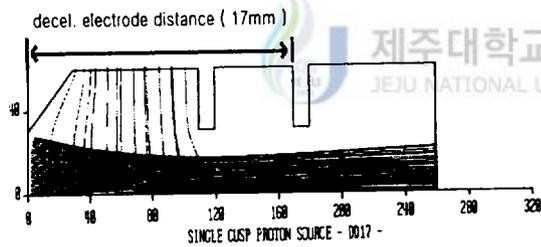
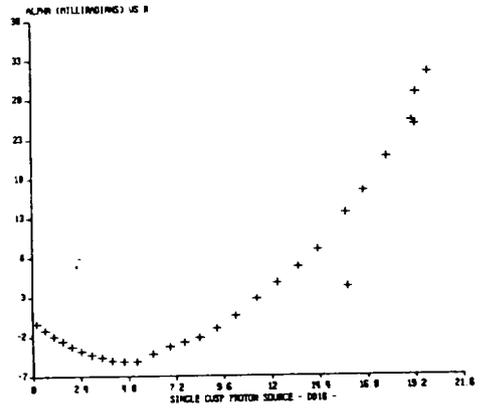


Fig. 12-6. Beam formation and divergence for
the different deceleration electrode angle (continued)



a) 16 [mm]



b) 17 [mm]

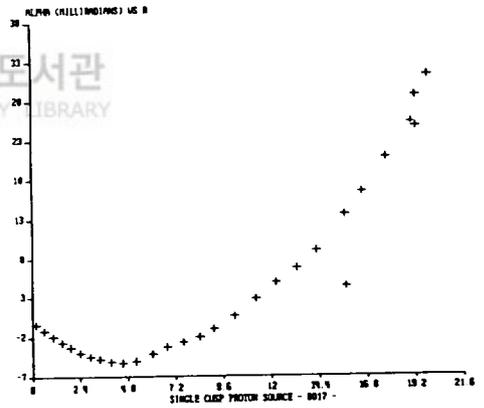
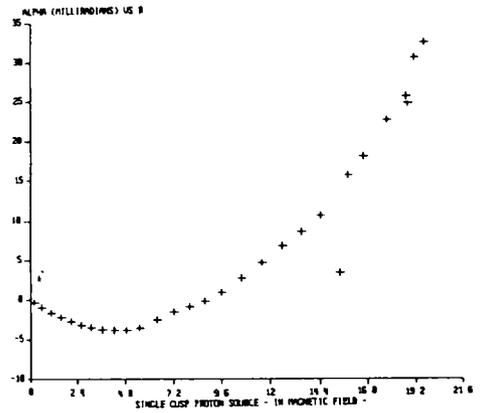
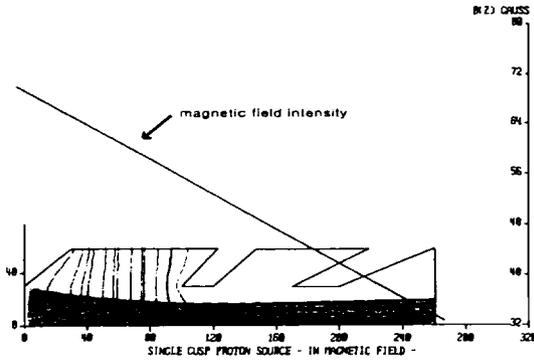
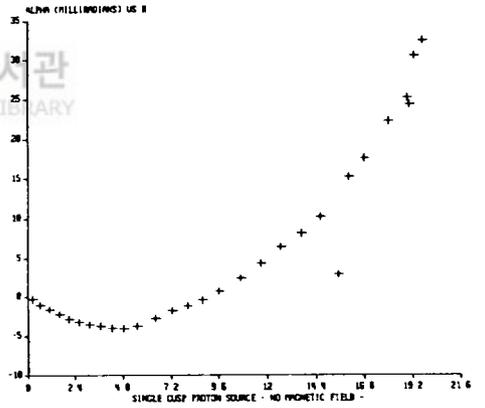
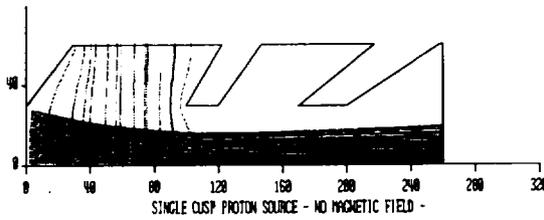


Fig. 12-7. Beam formation and divergence for
the different deceleration electrode distance (continued)

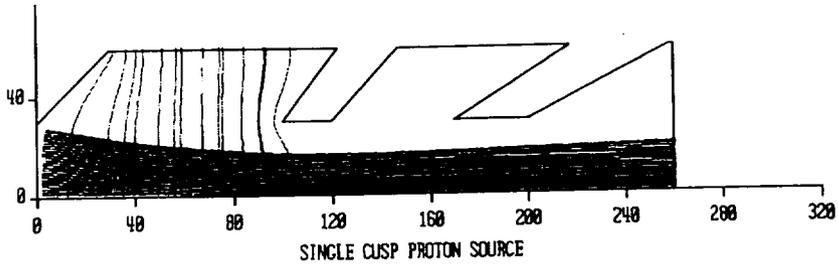


a) 유

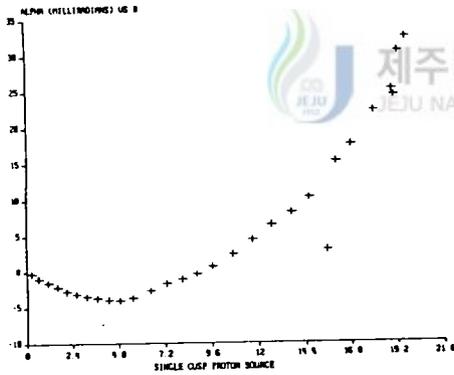


b) 무

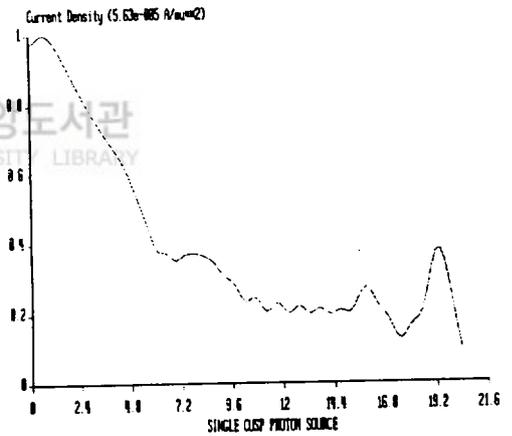
Fig. 12-8. Beam formation and divergence for the magnetic field existence



a)



b)



c)

Fig. 13. a) Beam formation, b) divergence and c) current density for the optimized extraction configuration

Table 6. Results of the various configuration of the extraction electrode

전극종류	형태변화 및 외부조건	결과
플라즈마전극	각도변화	빔발산각에 크게 영향을 미쳤고 44° 인 경우는 외향발산이 45° 보다 컸으며, 46° 인 경우 빔내부에 cross현상이 45° 보다 더 심하게 일어났다.
	내경변화	반경이 3.0mm인 경우가 외부 발산각, 내부 직진도 모두 양호하다.
	외경변화	반경이 6.0mm인 경우는 내부 직진도는 좋지만 외부발산이 6.2mm보다 심하다.
가속전극	각도변화	40° 인 경우가 외부 발산각, 내부 직진도 모두 양호하다.
	위치변화	1.1mm인 경우가 빔의 질, 인출전류량 모두 양호하다.
감속전극	각도변화	거의 변화가 없었다. 그러나 60° 인 경우가 절연 파괴현상이 가능성이 적다.
	위치변화	거의 변화가 없었다.
자계의 영향	유무	거의 변화가 없어 이온의 자유운동을 확인할 수 있었다.

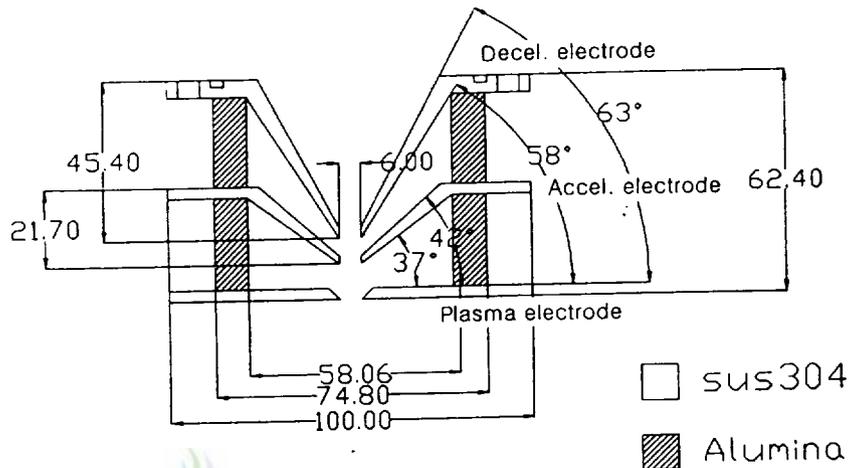


Fig. 14 Diagram of extraction part

3) 진공챔버 및 이온빔전류량 측정기(Faraday cup)

(1) 진공챔버

먼저 이온 빔전류량을 검출하기 위해서는 이온빔을 Faraday cup까지 수송해야 하기 때문에 자유공간의 잔류기체와의 전하교환 또는 전리 등의 상호작용을 고려해야한다. 이러한 상호작용을 최소화하기 위해 일반적으로 10^{-6} Torr 이하의 압력을 유지할 수 있는 진공챔버가 필요하다. Fig.15는 설계, 제작한

다용도의 횡형진공챔버와 진공시스템의 간략도를 나타낸 것이다. 1차진공펌프는 로타리펌프로써 10^{-2} Torr정도로 압력을 떨어뜨린 후 2차펌프인 확산펌프로 10^{-6} Torr의 진공공간을 얻을 수 있다 (Roth,1976).

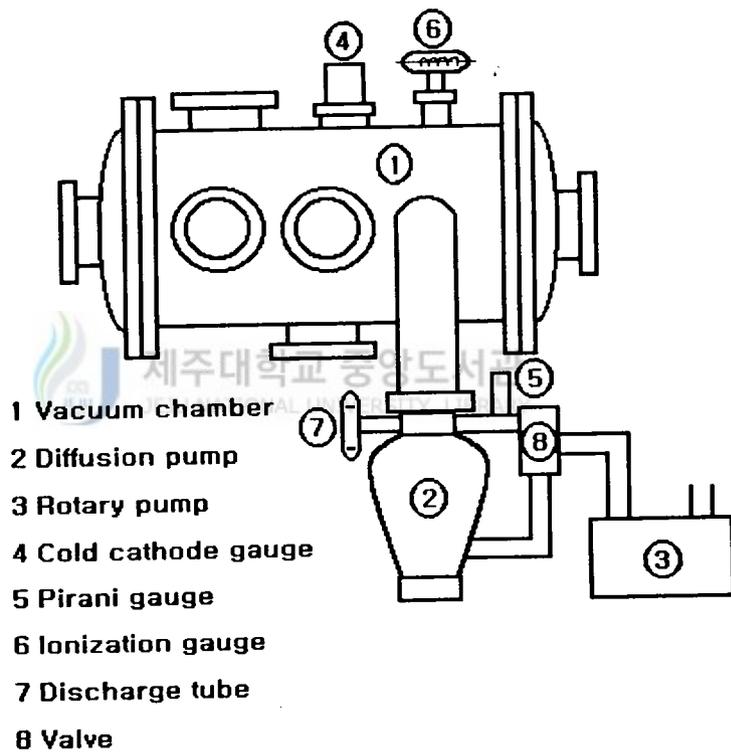


Fig. 15 Lay out of vacuum chamber and vacuum system

(2) Faraday cup

이온빔전류량을 측정하는 방법은 다음과 같이 크게 두 개로 분류될 수 있다.

- ① Online측정 : 직접전류측정, 운동량측정, 전력(열량)측정, 열잡음측정, 펄스전자계측정(펄스빔의 경우)
- ② 교체주입 이온량측정법 : 교체표면의 저항측정, 방사화분석, 표면분석

이온빔전류량을 측정할 때는 될 수 있는 한 간단하게 그리고 정밀도가 양호하게 측정되어야 한다. 이에 적합한 전류측정법인 직접전류측정법을 본 연구에서 이용하였다.

직접전류측정법이란 1차이온빔이 교체표면에 입사하여 흘러 들어오는 전류를 직접 측정하는 방법이다. 그러나 고에너지를 가진 빔이 교체표면에 입사할 경우 교체표면에서부터 2차전자, 2차이온, 스퍼터원자, 1차이온반사원자등이 발생하기 때문에 이들의 현상을 충분히 고려하여 측정기를 설계해야 한다.

2차이온, 스퍼터원자, 1차이온반사원자들의 생성량은 매우 작아 무시할 수 있으나 수keV이상의 이온빔인 경우 2차전자량이 무시할 수 없을 만큼 생성하기 때문에 이에 대한 영향을 억제시켜야 한다. 효과적인 방법은 M. Faraday가 고안한 것으로써 측정기를 컵형태로 만들어 2차전자들이 외부로 빠져 나오지 않게 하는 방법이다. 이러한 컵구조의 측정기를 흔히 Faraday cup이라 부른다 (Lochte-Holtgreven,1968). 이러한 구조만으로도 충분한 측정신뢰도를 얻을 수 있지만 보다 신뢰성을 향상하기 위해 본 연구에서는

Fig.16와 같이 컵 양쪽에 영구자석(50×25×15mm) 두 개를 설치하고 Biase 전압을 걸어 표면에서 나온 2차전자를 자계와 전계에 의해 가둘 수 있게 하였다.

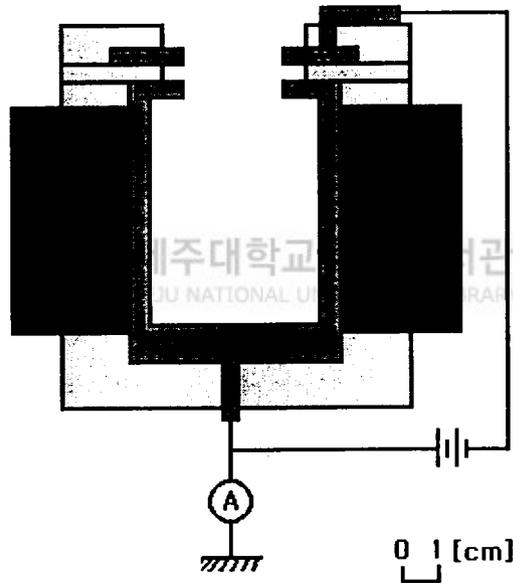


Fig. 16 Lay out of the Faraday cup

4) 전원

이온원의 전원은 Fig.17과 같이 시스템의 안전을 위해 진공챔버와 연결되는
감속전극을 접지로 잡아 이온원전체를 전기적으로 뜨게 하였다.

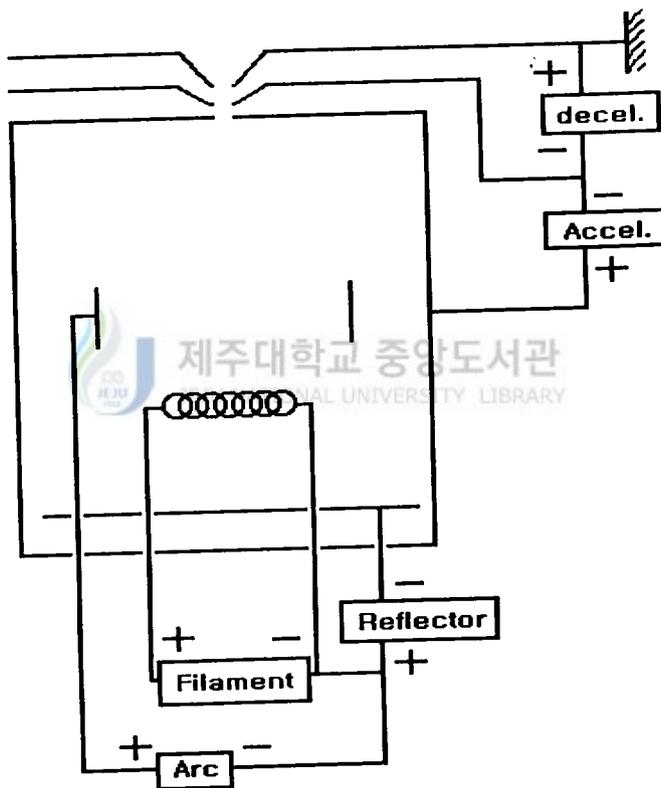


Fig. 17 Power circuit of ion source

5) 이온원 제작

이론과 각종 code의 계산결과를 토대로 설계한 이온원을 제작하였다. 제작한 이온원의 주요구성요소들을 소개하겠다. 먼저 PANDIRA code부터 얻은 계산결과를 토대로 20cm길이의 SUS304 아크챔버를 가공하였고, 이것을 기준으로 Fig.18과 Fig.19같은 영구자석 holder와 냉각자켓을 제작하였다. 영구자석 holder는 아크챔버중심부근에서 이동가능하도록 아크챔버의 외경(140mm)보다 2mm 큰 142mm로 내경을 가공하였고, 고정대 4개를 이용하여 원하는 위치에 자석 holder가 고정될 수 있게 하였다. 냉각자켓은 U자형 구리파이프를 냉각판에 부착했고 영구자석의 보호가 우선이므로 안쪽 냉각파이프 4개를 Inlet으로 택했다. 아크챔버내에서 플라즈마를 생성시키기위해 Fig.20 a)와 같은 플라즈마생성전극과 Feedthrough전극을 제작하였다. Fig.20 b)는 이들 전극들을 조립한 모습이고 Feedthrough전극의 절연체는 가공성이 좋고 사용온도가 높은 마콜을 이용하여 가공했다. 반사기는 될 수 있는한 많은 후방전자들을 반사시키기위해 직경을 132mm로 제작하였고 반사기Feedthrough전극 끝을 캡넛트를 이용하여 전장집중의 완화와 아크방전의 안정성을 향상시켰다. 아크전극의 위치를 상하로 조정할수 있도록 아크전극과 Feedthrough전극사이에 L자형 구리연결판을 이용하였다. 인출부의 플라즈마전극은 Fig.21에서 보이듯이 아크챔버를 전기적으로 뜨게 flange에 직접 가공하였다. Fig.22는 완성된 Faraday cup이고 Fig.23은 제작한 진공챔버와 진공시스템을 나타내었다. 이온원 인출부의 기계적안정성을 위해 진공챔버상부에 이온원을 장착하였다. 그리고 시스템의 전기적 안정성을 위해 진공챔버를 접지시켰다.

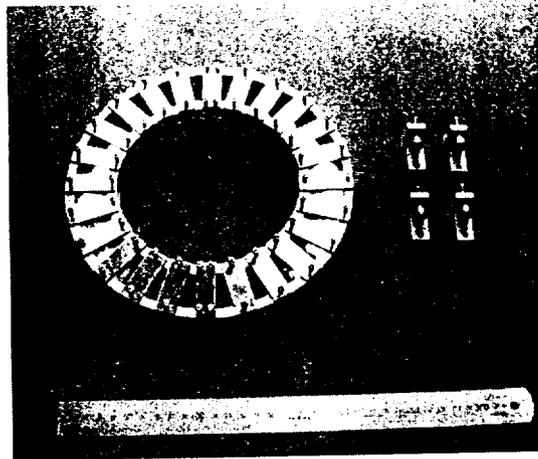


Fig. 18 Magnet holder

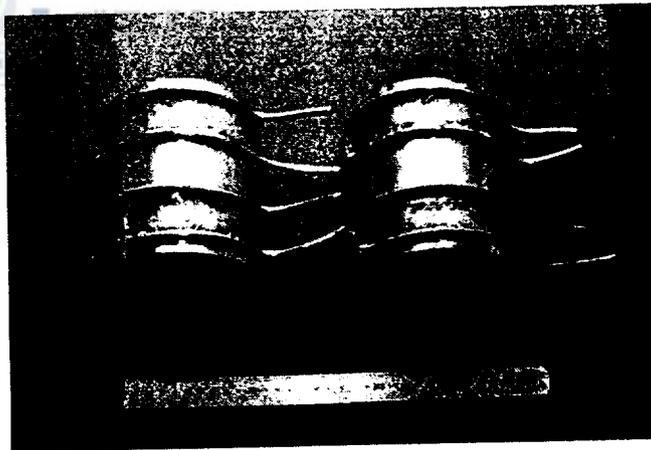
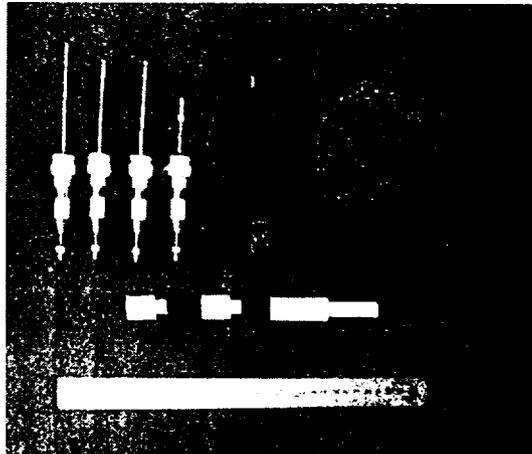


Fig. 19 Coolant jacket

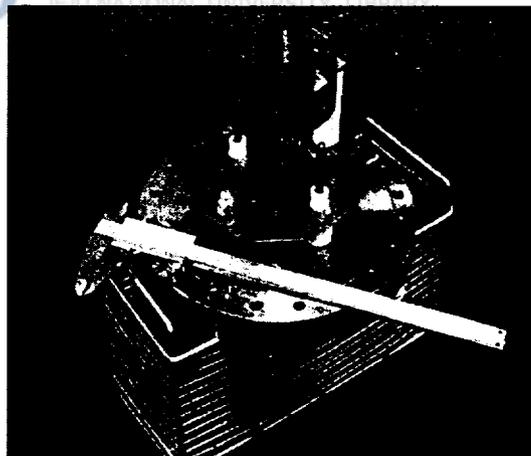


a)



제주대학교 중앙도서관

JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



b)

Fig. 20 Plasma production part

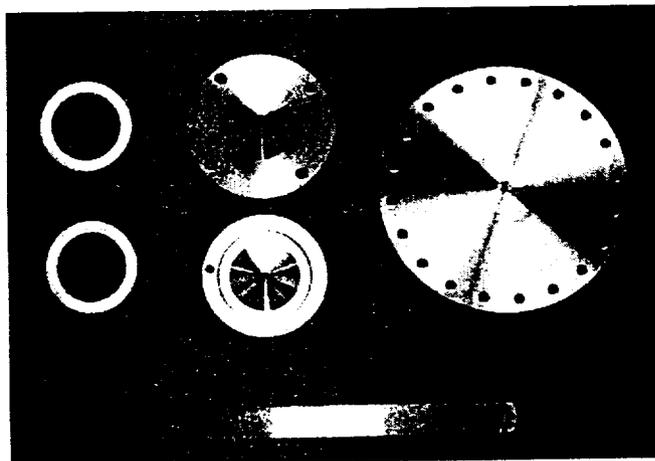


Fig. 21 Extraction electrode

 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

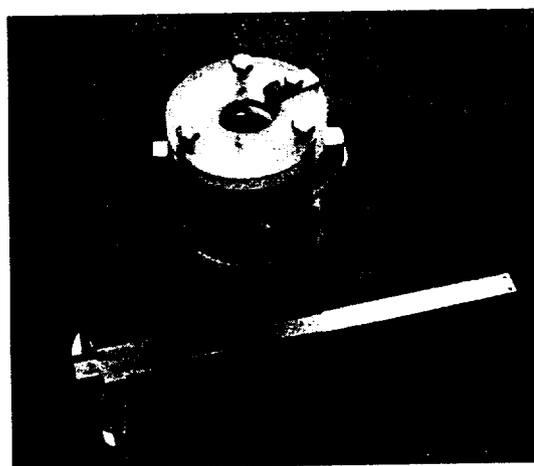


Fig. 22 Faraday cup

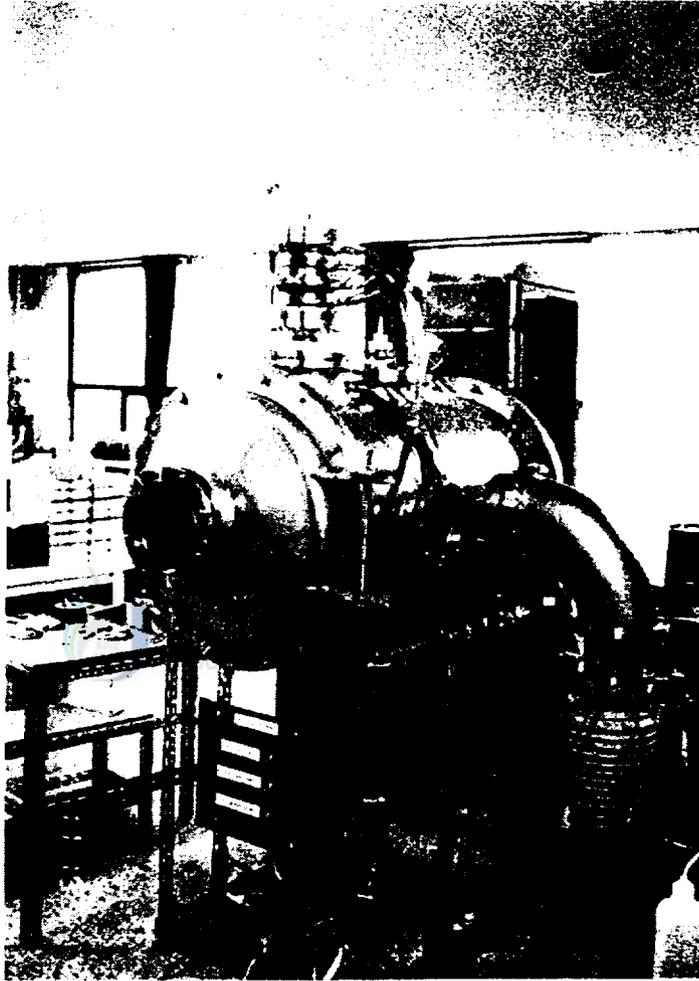


Fig. 23 Vacuum chamber and vacuum system

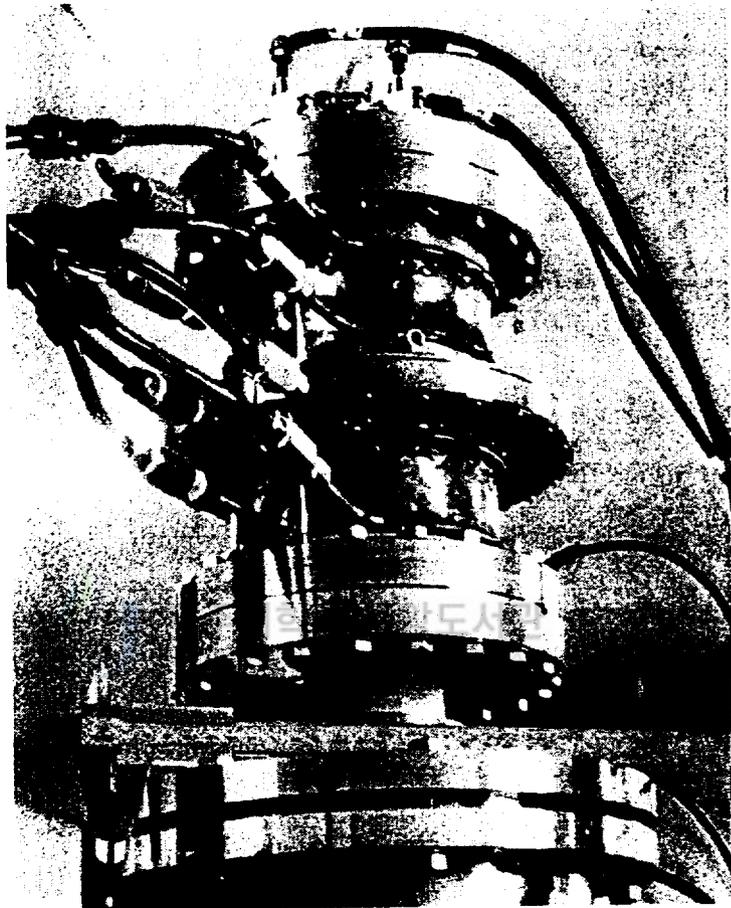


Fig. 24 The view of ion source

III. 결 론

Single Cusp형 전자충돌전리방식 플라즈마발생 수소이온원을 설계, 제작하였다. 플라즈마생성효율을 높이기 위해 Single Cusp형 자기회로와 반사기를 설치했고 플라즈마생성실 내부의 자장분포를 예측하기 위해 Poission Group code를 이용하였다. 여기서 플라즈마생성실 중심부에 충분한 이온의 가둠과 인출 부근에서의 이온의 자유운동이 가능하여 인출전계 영향을 충분히 받을 수 있는 것을 확인하였다. 에미턴스가 낮고 전류밀도가 높은 빔 직경이 5mm의 이온빔을 발생시키기 위한 가속-감속인출전극계를 적합하게 설계하기 위해 EGUN code를 이용했다. 그 결과 이온빔의 질은 플라즈마전극형태에 크게 의존하고 가속전극은 약간 의존했고 감속전극은 거의 영향을 미치지 않아 전자역류방지의 역할만 하는 것을 확인할 수 있었다. 설계, 제작한 수소이온원의 이온빔특성은 가속전극전위가 -20kV, 감속전극전위가 1kV일 때 인출전류량은 20.6mA, 규격화에미턴스는 $1.28 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{rad}$, 퍼비언스는 $7.87 \times 10^9 \text{ A} \cdot \text{V}^{3/2}$ 로 계산되었다. 이러한 빔의 질의 향상 및인출전류량이 높은 이온원의 연구를 통해 핵융합플라즈마의 거동특성분석과 표면물리분야의 국내 응용기술확립에 큰 이바지가 될 것이다.

IV. 참고 문헌

- 石川順三, 1986, イオン源工學, アイオニクス株式會社
- Menzel, M. T. and Stokes, H. K., 1987, User' Guide for the POISSON /SUPERFISH GROUP of Codes, Los Alamos National Laboratory
- Herrmannsfeldt, W. B., 1988, EGUN-AN ELECTRON OPTICS AND GUN DESIGN PROGRAM, Stanford Linear Accelerator Center
- Lochte-Holtgreven, W., 1968, Plasma diagnostics, North-holland publishing company
- Brown, I. G., 1989, The physics and technology of ion sources, John wiley & Sons
- Septier, A., 1967, Focusing of charged particles vol.II, Academic press
- Humphries, S. Jr., 1990, Charged particle beams, John wiley & Sons
- Kraus, J. D., 1992, Electromagnetics 4th., McGraw-Hill, Inc.
- Chen, F. F., 1984, Introduction to plasma physics and controlled fusion 2nd., Plenum press
- Roth, J. R., 1995, Industrial plasma engineering , Institute of physics publishing
- Roth, A., 1976, Vacuum technology, North-holland publishing company

감 사 의 글

부족함이 많은 저에게 모든 것을 바쳐주신 어머니의 사랑이 없었다면 이 논문은 물론 지금의 저는 없었을 겁니다. 오늘도 추운 날씨에 과수원에서 일하고 계신 아버님, 어머니에게 이 논문을 바칩니다.

논문을 완성하기까지 지도와 조언을 해주신 이현주 교수님과 항상 격려해 주시고 부족함을 일깨워 주신 이윤준 교수님, 조경호 교수님, 박재우 교수님, 천원기 교수님, 김신 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

언제나 힘들 때 큰 힘이 되어 주신 김휴찬 선배님, 김은숙 선배님, 장도현 선배님 그리고 논문을 완성하기까지 많은 도움을 준 후배 박재성 학우, 김태웅 행정선생님께도 깊은 감사를 전합니다.

지난 6년 동안의 아라캠퍼스 생활에서 많은 도움을 준 친구들과 선·후배에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.