

동 속 플라스마 집속 장치에서의
X - 선 방 출 에 관 한 연 구
The Study on X - ray Generation
in the Coaxial Plasma Focus Device

* 임 영 현 , 이 린 희
인 하 대 학 교 물 리 학 과

ABSTRACT

Mather type dense plasma focus device was developed for the feasibility study in its application to the x-ray lithography. To determine the electrical characteristics, the temporal behavior of the discharge current and the voltage was measured by using the Rogowski coil and the high voltage probe respectively. The results are $9 \mu s$ of the period, $18 m\Omega$ of resistance and $0.16 \mu H$ of inductance. The average current sheath velocity was measured by the light signal emitted at the moving plasma sheath. The light signal was detected through two fiber bundles. When the applied voltage was 13 kV and the initial pressure of argon was 21.8 Pa, the best plasma focus was occurred. The x-ray emission characteristics from the plasma focus was determined by the x-ray pictures taken by pinhole camera. It is focus that the plasma was focused at 1.4 cm distant position above the center electrode and its diameter was about 1.0 mm.

플라즈마 집속장치는 1962년 Filippov 에 의해서 처음 개발되었다. 플라즈마 집속장치는 z-pinch 와 θ -pinch 로 구분되고 z-pinch 에는 Filippov 형[1], hypocycloidal pinch 형[2], Mather 형[3] 등으로 구분된다.

본 실험에서는 1965년 미국의 Mather 에 의해서 개발된 이차원 z-pinch 효과를 이용한 장치 설계 및 제작하였다.

지금까지 알려진 사실로는 Mather 형 플라즈마 집속장치에서 집속된 플라즈마의 밀도는 $10^{19}/cm^3$ 이상이고, 플라즈마의 전자온도는 수 keV 이며 집속이 지속되는 시간은 100 - 150 ns, 집속된 플라즈마의 크기는 $10^{-2} cm^3$ 정도로 알려졌다.[4]

플라즈마 집속은 공급전압, 초기 기체압력, 중심전극의 길이를 조절하므로써 최적화 시킬 수 있다. 본 실험에서는 최대 충전 에너지가 2.5 kJ 인 축전기를 불꽃 간격 스위치와 직렬로 연결하여 에너지를 공급할 수 있게 하였으며, 중심전극의 길이를 23 cm로 제작하고 기체는 아르곤을 사용하였다. 본 연구에서는 먼저 방전특성을 조사하기 위하여 방전전류와 전압을 측정하고 공급전압과 초기 기체압력에 따른 전류층의 평균 이동속도를 측정하여 집속되는 최적 상태에서의 공급전압과 초기 기체압력을 결정하였다. 끝으로 베릴륨 투과창을 통하여 x-선 광원의 발생위치와

크기를 조사하였다.

II. 플라즈마 집속장치에서 플라즈마 집속의 형성 과정

중심전극 끝에서 고밀도 플라즈마 영역을 형성하는 플라즈마 전류층의 진행과정은 그림 1 과 같이 세개의 주요 상태로 나뉘어 진다. 처음에 초기 기체의 breakdown 과 포물선 모양의 전류면의 형성이고 두번째는 가속기의 끝을 향한 균일한 축대칭 전류층의 가속상태이며 세번째 상태로 고밀도 플라즈마를 형성하는 축대칭 전류층의 빠른 응축상태이다.

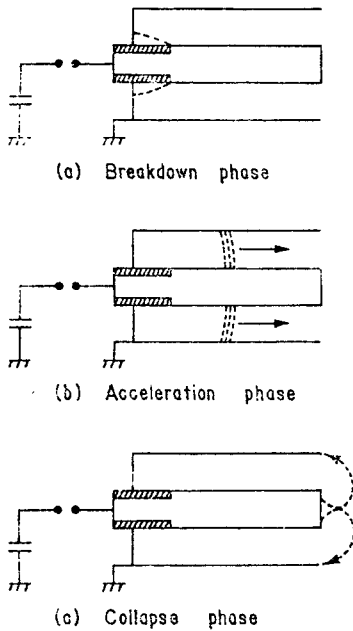


Fig. 1. Plasma focus development.

가속상태에서 중심전극의 끝으로 이동하는 전류층의 운동방정식은

$$\frac{d}{dt} (\rho v_z) = (J \times B)_z = J_r \times B_\theta \quad (1)$$

여기서 ρ 는 전류층의 순간 질량밀도 이고 v_z 는 축 방향의 속도이며 $J_r \times B_\theta$ 는 축 성분의 힘을

나타낸다. 식 (1) 에서 전류층의 단위 두께에 대한 전류밀도는 $J_r = I/2\pi r_0$ 이고, 자기장은 $B_\theta = \mu_0 I/2\pi r_0$ 이다. 여기서 r_0 는 중심으로부터 전류층의 평균거리이다. 식 (1)의 해를 구하기 위해서는 전류층의 운동량을 구하여야 한다. 본 연구에서는 플라즈마 동리학에 관한 모델로서 동축형 플라즈마 집속장치에 적합한 snowplow 모델을 이용하여 식 (1)의 해를 구하고자 한다. 즉 전류의 단위 두께에 대하여 $t = 0$ 에서 방전이 시작되어 t 에서 전류층의 위치를 z 라 하면 snowplow 모델에 의하여 전류층의 밀도는 초기에 주입된 기체밀도를 ρ_0 라 할때 $\rho = \rho_0 z$ 가 된다. 따라서 식 (1)은

$$\frac{d}{dt} (z \frac{dz}{dt}) = \frac{\mu_0}{\rho_0} \left(\frac{I}{2\pi r_0} \right)^2 \quad (2)$$

플라즈마 집속장치에서 축전기에 저장된 에너지가 인가될때 전체 회로의 임피던스에서 $R, \omega L \ll 1/\omega C$ 이므로, 회로에 흐르는 전류를 $I = I_0 \sin \omega t$ 로 가정하여 식 (2)를 적분하고 전류가 최대 되었을때 전류층이 중심전극의 상단까지 이동하여야 하므로 전류가 최대가 되는 시간 $t = \pi/2\omega$ 와 전극의 길이 $z = l$ 을 대입하면

$$l = 1.5 \times 10^{-4} \frac{C V_0}{r_0 \sqrt{\rho_0}} \quad (3)$$

여기서 V_0 는 축전기에 충전된 전압을 나타낸다. 또한 전류층의 평균 이동속도는 $t = \pi/2\omega$ 시간 동안에 $z = l$ 만큼 이동하므로 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{V}_z = \frac{l}{\pi/2\omega} = 0.95 \times 10^{-4} \frac{V_0}{r_0} \sqrt{\frac{C}{\rho_0}} \quad (4)$$

식 (4)에서 평균 이동속도는 가해진 전압에 비례하고 초기에 주입한 기체의 압력에 대하여는 제곱근에 반비례하는 것을 알 수 있다.

III. 실험 및 측정

1. 집속장치의 설계 및 제작

그림 2와 같이 Mather 형 Dense Plasma Focus (DPF) System을 설계 및 제작하였다.

집속장치의 동축 전극에 대하여 중심전극의

직경을 25 mm, 외곽전극의 직경을 10 cm 로 하고 그 길이는 식 (3) 에 의하여 구하였다. 즉, $c = 25 \mu F$, $V_0 = 20 \text{ kV}$, $l_0 = 3.5 \text{ cm}$ 로 하고 아르곤 주입압력을 $40 \mu\text{mHg}$ 로 가정하여 전극의 길이를 구하면 $l = 23 \text{ cm}$ 가 된다. 따라서 중심전극의 길이는 23 cm 로 하여 전극을 제작하였다. 구리봉으로 된 중심전극 끝에 길이 5 cm 인 여러 형태의 전극을 교환할 수 있게 설계 되었으며 본 실험에서는 그림 2 와 같이 직경 10 mm 의 홈을 내어 플라즈마의 집속이 전극으로부터 떨어진 위치에 형성될 수 있도록 하였다. 중심전극의 아래부분은 길이 70 mm 의 Pyrex 유리를 사용하여 음전극과 절연되면서 플라즈마 형성의 초기상태인 표면전류를 균일하게 형성할 수 있게 되어있다. 음극은 직경이 2 mm 이고 길이가 21 cm 인 황동봉 48 개를 음극 밑판에 꽂아 만들었다.

2. 집속장치의 방전 특성

방전전압 $V(t)$ 와 방전전류 $I(t)$ 를 측정하여 회로의 저항과 인덕턴스등을 구할 수 있다. 방전전압은 1000 : 1 probe (p 6015) 를 중심전극에 직접 연결하여 오실로스코프 (7834 storage OSC. Tektronix) 로 측정하였다. 방전전류는 변화하는 전류로 인한 자기유도 현상을 이용하여 전류를 측정할 수 있는데 가장 간단한 방법은 측정할 전류 근방에 자기유도 코일 (Rogowski 코일) 을 놓으므로써 측정할 수 있다. [5,6,7] 측정한 결과, 방전주기가 9 μs 이고 외부회로의 저항과 인덕턴스가 각각 18 m Ω 과 0.16 μH 이며 방전전류는

$$I(t) = 40 V_0 \exp(-5.6 \times 10^4 t) \sin(7 \times 10^5 t \times 5)$$

임을 알았다.

3. 전류층의 이동속도

측정

본 실험에서는 두 개의 광섬유 다발을 5 cm 간격으로 진공봉에 부착하여 중심전극 밑부분에서 윗부분으로 이동하는 플라즈마 전류층에서 방출되는 빛을 검출하여 오실로스코프에 나타나는 두 개의 파형으로부터 시간 간격을 측정해서 속도를 구하였다.

기체의 압력과 속도 그리고 전압과 속도의 관계가 그림 3 과 4 에 나타나있다.

두 관계식으로부터 전류층의 평균 이동속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{V}_z = 215 \frac{V_0^{0.8}}{P_0^{0.3}} \text{ (m/s)} \quad (6)$$

여기서 V 와 P 의 단위는 각각 V 와 Pa 이다. 플라즈마 집속이 가장 잘 일어나고 플라즈마 에너지가 최대가 되는 최적조건은 집속장치의 전류층 뒤에 저장된 자기 에너지를 최대로 하여야 하고 이것은 전류가 최대치를 가질 때에 발생되며 그 시간은 주기의 1/4 이 되는 시간이다. 앞에서 구한 방전전류의 측정으로부터 주기가 9 μs 이므로 2.25 μs 에서 전류가 최대치를 갖는다. 이때의 전류층의 이동속도는 $9 \times 10^4 \text{ m/s}$ 이다. 이 최적 조건의 속도를 식 (6) 에 대입하여 공급전압을 13 kV 로 결정하면 기체압력의 최적치는 21.8 Pa 로 결정되어진다.

4. 집속된 플라즈마의 특성 조사

Z-pinch 힘으로 인한 중심전극 끝면에서의 집속된 플라즈마의 특성을 조사하기 위해서 바늘구멍 사진기를 사용하여 플라즈마의 집속되는 위치와 크기를 측정하였다. 그림 5 는 집속되는 위치인 중심전극 끝면으로부터 14 mm 떨어진 위치에 베릴륨 부과창을 설치하고 이 부과창을 통해서 x-선 을 조사한 것이다. 그리고 방전을 40 번 반복하여 감광시킨 것으로 왼쪽부분에 타원 모양은 중심전극에 직경 1 cm 의 홈을 낸 부분을 나타내고 x-선 광원은 감광된 x-선 필름을

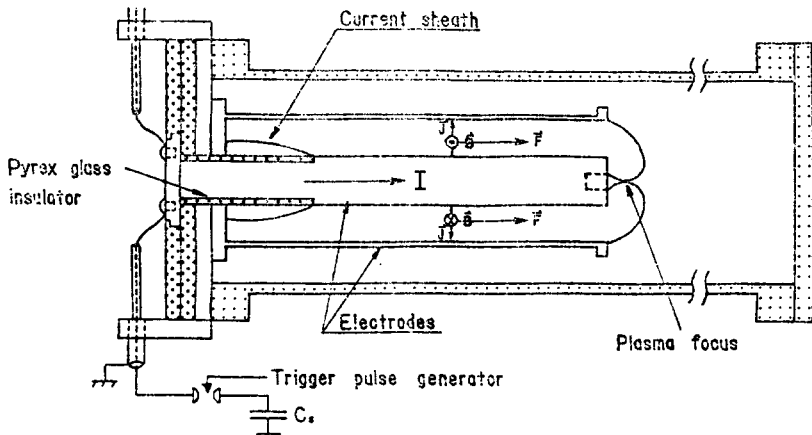


Fig. 2. Dense plasma focus device.

⋯⋯ Lucite.

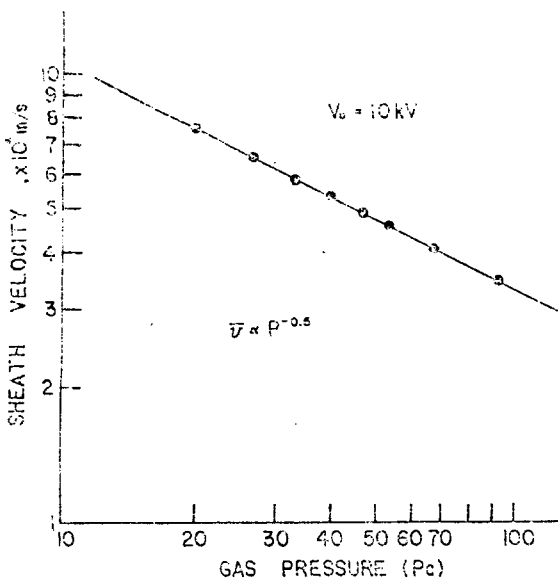


Fig. 3. Measured current sheath velocity vs Ar fill-pressure at constant charging voltage.

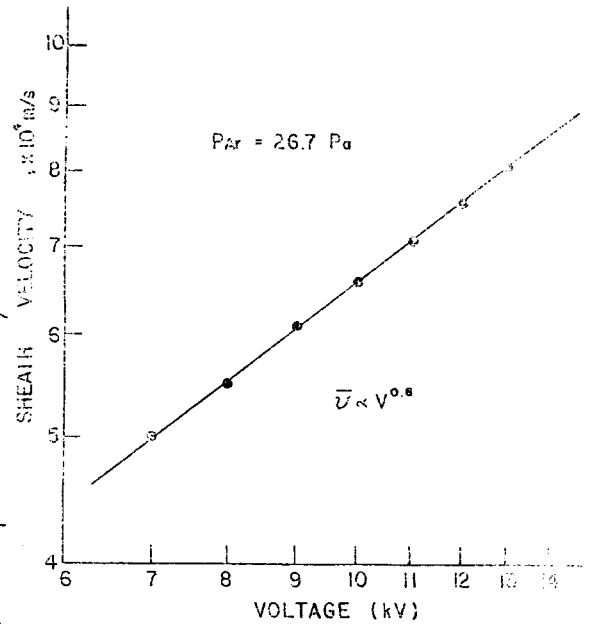


Fig. 4. Measured current sheath velocity vs charging voltage at constant Ar pressure.

microdensitometer 를 사용하여 측정한 결과 직경 1.0 mm 의 크기에 구형입을 알 수 있었다.



Center electrode. Focused X-ray image.
 Fig. 5. X-ray pinhole photograph of the focus region through the beryllium window.

IV. 결 론

그림 3 과 4 에서 알 수 있는 바와 같이 초기 기체의 압력이 감소하고 전압이 증가함에 따라 속도가 증가함을 알 수 있었다. 그 관계식은 식 (6) 에 나타나 있고 이 식으로 부터 최적 조건의 공급전압과 기체압력 (13 kV, 21.8 Pa) 을 결정할 수 있었다. 이 실험값을 이용하여 실험한 결과 1.0 mm 이하의 비교적 안정한 x-선 광원을 얻을수 있었으나 보다 안정된 광원을 얻고 중심전극의 손상을 막기 위하여 중심전극에 자기장을 형성시켜주는 문제[8] 를 고려 하여야 하고 기체의 종류에 따른 실험과 x-선의 파장조사[9] 를 하여야 한다.

참 고 문 헌

(1) J. H. Lee, et. al., Plasma Physics 20, 1025 (1978).

(2) J. H. Lee, et. al., Appl. Opt. 19, 3343 (1980).
 (3) J. W. Mather, " Methods of Experimental Physics ", vol. 9, chapter 5, New York (1971).
 (4) J. W. Mather and P. J. Bottoms. Fluids 11, 611 (1968).
 (5) R. H. Huddleston and S. L. Leonard, " Plasma Diagnostic Techniques ", chapter 5, London (1965).
 (6) D. G. Pellinen, et. al., Rev. Sci. Instrum. 51, 1535 (1980).
 (7) J. W. Anderson, Rev. Sci. Instrum. 42, 915 (1971).
 (8) J. W. Mather, et. al., Phys. Fluids 12, 2343 (1969).
 (9) E.L. Beckner, et. al., Phys. Fluids 12, 253 (1969).