《연구논문》 The Journal of Optical Society of Korea(Korean Edition) Volume 1, Number 1, March 1990

마더형 플라즈마 집속장치의 제작과 특성

김동환·이상수
한국과학기술원 물리학과

조 성 국
한국과학기술연구원 생산기술연구실

김 규 욱
한국표준연구소 레이저연구실

이 민 희
인하대학교 이과대학 물리학과

(1990년 2월 7일 받음)

최대 10 kJ의 에너지를 공급할 수 있는 Mather형 플라즈마 집속장치를 설계, 제작하였다. 이 DPF 장치의 전기방전 특성을 알기 위해 Rogowski 코일을 제작하고 방전전류, 전압을 측정하여 본 system의 저항과 인덕턴스는 각각 20 mΩ과 0.2 μH로 밝혀졌다. 플라즈마 전류 sheath의 이동속도는 충전개스 압력과 전압에 따라 $P^{-0.25} \times V^{0.38}$의 함수로 비례하며 집속된 플라즈마의 크기는 직경 3 mm, 길이 17 mm로 밝혀졌다.

I. 서 론

고밀도, 고에너지의 플라즈마에 대한 연구는 발생과 유지에 관한 문제를 해결하기 위해 발전해 왔고, 진행되고 있다. 실제 자연계에서 고에너지, 고밀도 플라즈마는 별의 질량 정도에 해당하는 중력에 의한 것이므로 실험실에서 고밀도, 고온 플라즈마연구는 다른 힘에 의한 접근방법을 찾게 되었다. 이의 한 방법으로 같은 방향의 전류가 자기적으로 압축되는 pinch 효과를 이용한 것인데 pinch 효과는 플라즈마 특성연구와 핵융합에 대한 기대로 1960년대부터 관심이 모아졌고 그 방법 또한 여러가지 유형으로 발전하였다.[1] 플라즈마 집속장치는 1962년 Filippov에 의해서 처음 개발되었고 Mather형, Hypocycloidal pinch(HCP), Z-pinch형, θ-pinch형 등이 있으며 본 실험에서 사용된 플라즈마 집속 장치는 2차원 Z-pinch 효과를 나타내는 플라즈마 방전장치로 1965년 미국의 Mather에 의해서 처음 시작된 형태이다.[2,3]

Mather형 플라즈마 집속장치에서 발생되는 플라즈마는 밀도가 $10^{19}/cm^3$ 이상이고 플라즈마 전자온도는 수 keV이며 플라즈마의 지속시간은 100-150 nsec로 보고되었다. 플라즈마 집속의 구속조건은 집속장치의 인덕턴스, 충전전압, gas 압력 그리고 전극의 길이와 간격 등이다. 본 실험에서는 플라즈마에너지가 최대가 되도록 외부 조건을 조절하기 위해서 플라즈마 집속계의 전기적 특성과 전류 sheath의 동력학적 특성을 결정하였다. 이를 위하여 Rogowski coil을 사용하여 방전전류를 측정하고 이로부터 외부 자기유도와 저항 그리고 gas 압력과 충전전압에 따른 sheath의 이동속도를 측정하였다.

형성된 플라즈마를 진단하는 다른 방법으로서, 플라즈마로부터 방출되는 복사선을 측정하는 것인데, 연속 X-선 방출특성으로부터 플라즈마의 전자온도와 플라즈마의 크기를 구하였다.[4,5]

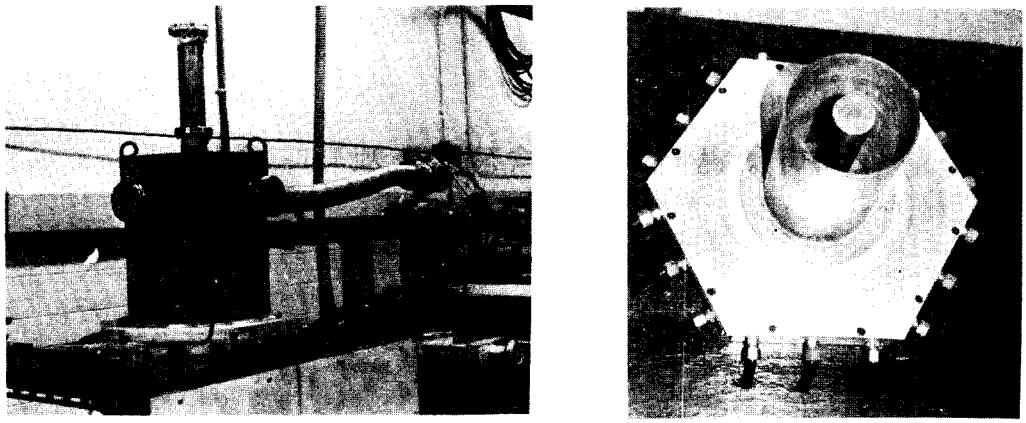

Fig. 1. (a) Over all dense plasma focus (DPF) system. (b) Center and electrode outer electrode.

II. 플라즈마 집속장치의 설계 및 제작

본 연구에서 제작한 플라즈마 집속장치는 그림 1과 같은 Mather형이다. 이 장치는 진공 chamber, 고전압 공급장치(high voltage power supply), 콘덴서, spark gap, 트리거 펄스발생기(trigger pulse generater), 내외 전극(center and outer electrodes) 등으로 이루어진다. 그림 2에서 (a)는 고전압 공급장치로 1-25 kV 까지 전압을 공급할 수 있다. (b)는 고전압을 저장하는 콘덴서(Maxwell사 제품, 100 μF, 내전압 10 kV)로 두 개를 직렬로 연결하여 용량이 50 μF, 내전압 20 kV로 하여, (a)에서 공급하는 전압을 20 kV로 하였을 때는 저장되는 에너지는 10 kJ이다. (c)는 spark gap으로 콘덴서에 충전된 전압을 (d)의 트리거 펄스장치를 이용하여 트리거시킴으로써 원하는 시간에 실험할 수 있도록 하였다. Spark gap은 air spark gap으로서 간격은 1-15 mm까지 조절할 수 있도록 하였으며 자동 트리거되는 전압, 즉 breakdown 전압을 측정한 결과 이는 간격에 직접 비례하였고 Paschen Back 법칙을 잘 만족하였다. Spark gap 간격은 전압에 따라 안정되게 트리거되도록 하기 위하여, 자연 방전전압의 1.2배가 되도록 유지하였다. (e)는 중심 전극으로 직경 5 cm, 길이 25 cm인 구리로 되어있다. Spark gap을 통해서 트리거된 고전압이 이 중심 전극에 전달될 때 인덕턴스 및 저항을 줄이고 잘 전달시킬 수 있도록 동축케이블(coaxial cable) 18개를 통하여 전달되도록 하였다. (f)는 둥근 알루미늄판으로 이 18개의 동축 케이블을 고정시켜서 중심전극에 연결하였다. 이 때 고전압과 접지판(ground plate, 그림 1(h)를 절연시키기 위하여 두께 300 μm인 mylar판(그림 1(g)) 5장을 (f)와 (h)

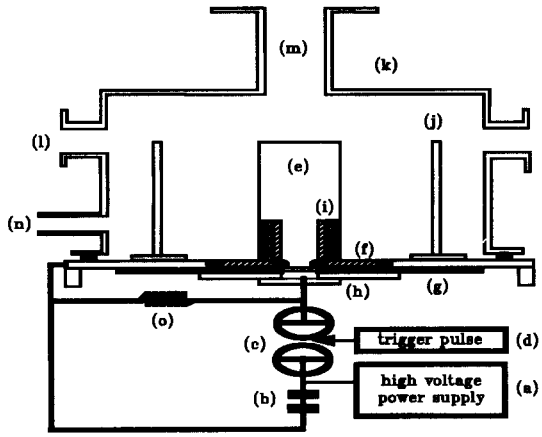

Fig. 2. The structure of plasma focus system. C: capacitor (50 uF, 20 kV, 0.08 uH), R: water resistor (10Ω), OE: outer electrode, CE: center electrode, PS: power supply, TP: trigger pulse, SG: spark gap.

이론 봉을 깍아서 만들었고, 검은 부분은 pyrex 유리로 되어있으며, 점친 부분은 torr seal로 채웠다. (j)는 외각 전극으로 반경이 15 cm, 두께 3 mm, 높이 25 cm인 구리로 된 원통형(cylinder)이다. (k)는 진공통(vacuum chamber)으로 stainless steel로 만들어졌으며 높이 37.5 cm, 직경 30 cm이고 10^{-3} torr의 진공도로 (1)의 진공창을 통하여 유지되어 있다. (1)의 진공창은 서로 직각이 되게 네 개를 만들었으며 그 중 한 개는 진공펌프에 연결하였고, 나머지 세 개는 장치안을 관찰할 수 있도록 유리로 막았다. (n)은 진공을 뽑은 후 Ar이나 D_2 등의 기체를 넣기 위한 구멍이고, (o)는 물저항 사이에 끼워두었다. (i)는 절연체로 고전압이 처음 중심

전극에 걸리게 되면 플라즈마의 파손상태를 이루게 된다. 이 절연체는 세 부분으로 되어있어서 빗금부분은 나(water resistor)으로서 황산구리 수용액을 길이 5 cm, 직경 1.5 cm인 tygon tube안에 넣고 황동으로 만든 전극으로 밀봉하였는데 이 때, 저항은 180 Ω이며 이 물저항 18개를 중심 전극에 연결되는 동축 케이블과 회로의 접지 사이에 연결하였다. 제작된 DPF 장치의 전체적인 모습과 각각의 전극이 그림 1에 나타나있다.

III. DPF(Dense Plasma Focus) 장치의 전기적 특성과 플라즈마 집속

그림 1과 같이 제작된 DPF 장치의 전기적 특성을 조사하였다. 콘덴서에 저장된 전압을 spark gap을 통하여 방전시킬 때 방전전압을 측정하기 위하여 1000 : 1 probe의 두 전극을 물저항의 양단에 연결하여 storage oscilloscope(HP1744A)로 측정하였다.

그림 3은 콘덴서에 저장하는 전압을 15 kV, 18 kV 그리고 충전 Ar gas 압력 100 μm와 300 μm Hg에서의 DPF 방전전압을 storage oscilloscope(HP1744A)로 측정한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 전기방전시 측정한 전압파형에서 특이점(singularity)들이 나타나고 있는데, 이것은 플라즈마 집속이 일어나는 시간 및 전압을 보여준다.

여기서 (a)와 (b) 그리고 (c)와 (d)를 비교하면 전압의 증가에 따라 전압 특이점까지의 시간이 짧아지고 (a)와 (c) 그리고 (b)와 (d)를 비교해서 gas 압력이 낮아짐에 따라 sigularity까지의 시간이 짧아짐을 관측할 수 있다.

이와 같은 방법으로 10, 30, 50, 100 그리고 200

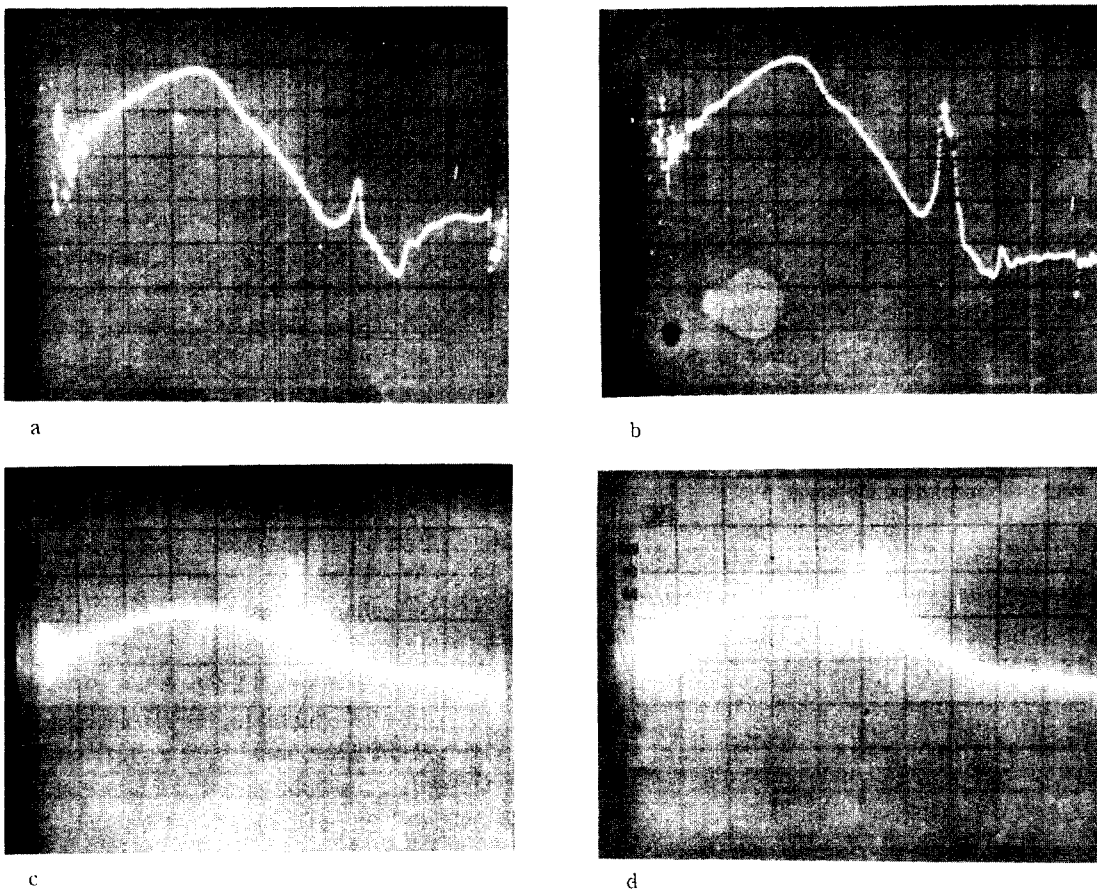

Fig. 3. Time behavior of discharge voltage as a function of charging voltages and Ar gas pressure. (a) 15 kV, 300 umHG (b) 18 kV, 300 umHg (c) 15 kV, 100 umHg (d) 18 kV, 100 umHg.

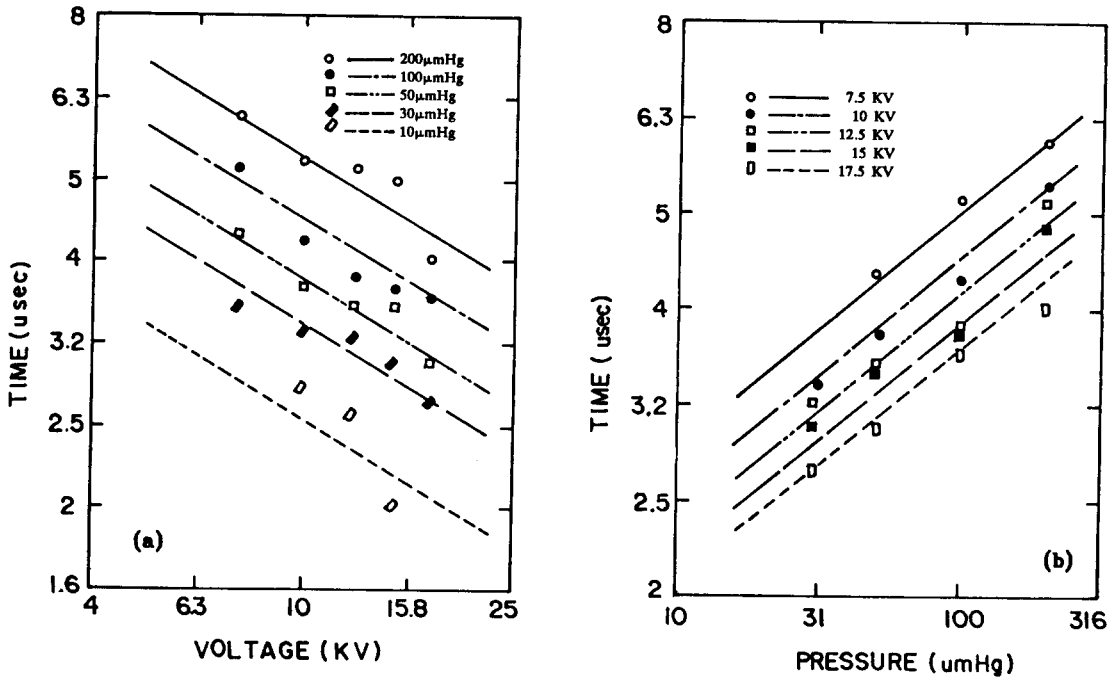

Fig. 4. (a) Time to the voltage singularity as a function of charging voltage for various Ar gas pressure. (b) Time to the voltage singularity as a function of Ar pressure for various charging voltage.

μmHg의 Air gas 압력과 7.5, 10, 12.5, 15 그리고 17.5 kV의 충전전압 조건에 대해 측정한 방전전압의 특이점까지 걸리는 시간이 그림 4에 나타나 있다.

플라즈마가 집속되는 과정은 크게 파손상태(breakdown phase), 가속상태(acceleration phase), 응축상태(collapse phase)의 세 가지로 나누어 설명할 수 있다.[2,6]

1. 파손상태(breakdown phase)

중심 전극에 고전압이 공급되면 0.1μs 이내에 절연체(그림 1(i))를 따라서 중심의 양(+)전극에서 외각의 음극(−)의 밑판으로 흐르는 전류 때문에 breakdown이 일어난다. Breakdown은 처음 0.1μs 사이에 radial 방향으로 일어나며 가느다란 실모양을 갖는다. 전류의 흐름(current sheath)은 음극의 밑판에서 점점 음극의 원통부분까지 밖으로 이동하며 이 때까지의 시간은 기체의 압력 및 걸리는 전압에 따라 달라지지만 대개 0.8 μs-1.2μs 정도가 걸린다.

2. 가속상태(acceleration phase)

전류가 흐르는 면은 평평하지 않고 자기압력균배(magnetic pressure gradient)가 radial 방향을 갖기 때문에 양극에서 음극쪽으로 구부러져 있다. 전류경계에 수직하게 작용하는 총가속력($\vec{J}\times\vec{B}$)은 radial과 axial 운동을 일으킨다. 여기서 Radial 성분은 음극쪽으로 향하므로 전류의 흐름은 외각전극의 안쪽표면 방향이다. Axial 성분의 크기는 중심 전극에서부터의 거리의 제곱에 반비례하고, 중심 전극의 표면근처에서 속도가 가장 크다. 전류의 경계가 포물선 모양(parabolic)이므로 플라즈마는 가속이 계속되는 동안 전류의 경계를 따라서 양극에서 음극으로 원심적으로 밖으로(centrifugally outward) 흐른다.

3. 응축상태(collapse phase)

응축상태에서는 축 대칭인 전류의 흐름이 빨리 축으로 모이고, 플라즈마가 집속된 지점에서 저장된 자기에너지가 플라즈마에너지로 변환된다. 이 상태에서는 집속된 플라즈마는 축방향으로는 전자기력 평형상태가 아니므로 쉽게 달아나며, 이 응축시간 동안에 충돌하는 전자와 이온의 가열작용이 일어난다. 플라즈마 집속장치의 전기회로는 그림 5(b)와 등가회로로 나타낼 수 있는데 그림에서 a, b 사이에 걸리는 전압은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V(t)=\frac{d}{dt}\{L_p(t)I(t)\}+I(t)R_p(t) \qquad (1)$$

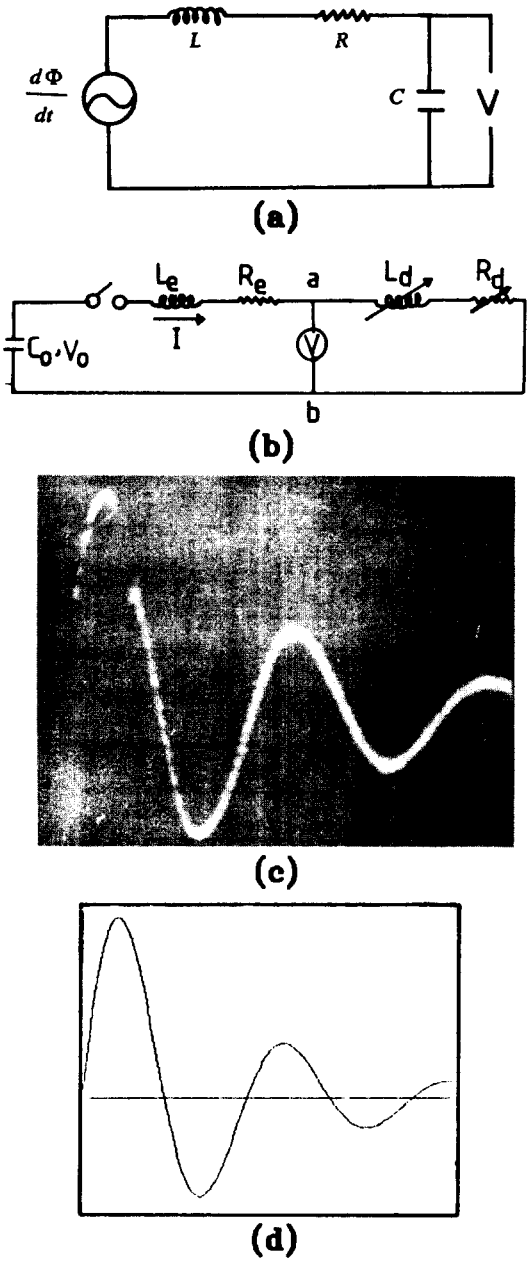

Fig. 5. (a) Equivalent circuit of the Rogowski coil. (b) Equivalent circuit for the plasma focus discharge. (c) Current signal measured by using Rogowski coil. (X-axis 5 usec/div., Y-axis 1V/div.). (d) Calculated curve to fit the measured signal. (I = exp (−0.05t) × sin(0.27t), t in usec).

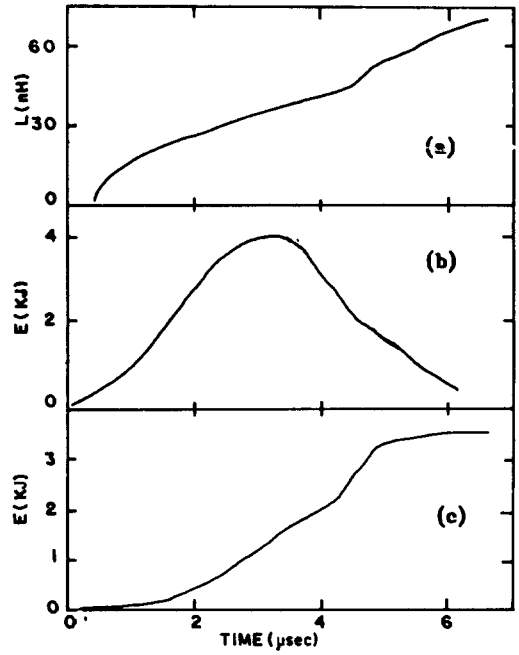

Fig. 6. Time behavior of (a) discharge inductance, (b) magnetic energy, (c) mechanical energy.

$V(t)$는 a-b 간에 걸리는 전압이고, $L(t)$는 방전하는 동안에 생기는 유도인덕턴스, $R_d(t)$는 플라즈마 전류흐름의 유효저항(effective resistance)이다. 외부 저항 R_e의 값과 외부 인덕턴스 L_e값은 전극 a, b가 전기적으로 연결되었을 때 결정되며 그림 5(c), (d)식에서 Rogowski 코일을 사용하여 측정한 전류파형과 그것에 fittintg 하여 얻은 계산된 전류파형이 나타나 있다. 이로부터 $L_e=0.2\,\mu$H, $R_e=20\,\text{m}\Omega$을 얻고 이를 이용해서 충전전압이 17.5 kV, Air gas 압력이 200 μmHg의 조건에서 방전인덕턴스, 저장되는 자기에너지, 전류 sheath의 역학에너지 등을 계산할 수 있는데 이들의 표현은 다음과 같으며 이들 각각의 결과가 그림 6에 나타나 있다.

(a) Disharge industance

$$L_D(t)=\int_0^t [V(t)-I(t)R(t)]dt/I(t)$$

(b) Magnetic energy storage

$$E_1(t)=\frac{1}{2}[L_e+L_D(t)]I(t)^2$$

(c) Current sheath mechanical energy

$$E_m(t)=\int_0^t \dot{L}(t)\ I(t)^2\,dt$$

이를 살펴보면 그림 6에서 (a)의 방전인덕턴스는 전압신호의 특이점 시간까지 거의 선형적으로 증가하고 있으며

이는 제 4절에서 논의할 플라즈마 sheath의 속도계산에서 세울 가정의 타당성을 뒷받침한다. 또 역학적 에너지는 플라즈마 kinetic energy와 내부 에너지를 나타내는데 전압 특이점에서 약간 빠른 증가를 나타내고 있고 이는 곧 자기에너지가 역학적 에너지로 급변하여 고밀도, 고에너지의 플라즈마를 얻을 수 있음을 시사해 준다. 측정된 방전전압 신호에서 peak치의 full width half maximum 값이 500 nsec로 나타났는데 이는 보통 알려진 100-150 nsec보다 훨씬 긴 시간인데 이는 전극 사이의 간격이 10 cm로서 다른 실험장치보다 5 cm 정도 더 길기 때문이다.

IV. 집속된 플라즈마의 특성 조사

1. 플라즈마 sheath 평균이동속도 측정

DPF chamber 내에 Ar gas를 10, 30, 50, 100, 200 μmHg의 압력과 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 kV의 충전전압에 대해 방전전압의 특이점까지의 시간변화를 측정하였다. 플라즈마 sheath의 이동속도는 플라즈마 이동거리를 방전 특이점까지의 시간으로 나누어 구할 수 있는데 Ar gas의 압력과 충전전압의 함수로 전압의 특이점까지의 시간변화가 그림 3에 나타나있다. 결과에서 sigularity time을 최소자승법으로 압력과 충전의 함수로 fitting하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$t(P, V)=3.5P^{0.25}/V^{0.38} \tag{2}$$

여기서 t의 단위는 μsec이고 P는 μmHg, V는 kV이다. 플라즈마 sheath의 이동속도는 singularity time에 반비례하는데 25 cm의 electrode를 따라 plasma sheath가 이동한 시간이 3-6 μsec이므로 plasma sheath의 평균이동속도는 4-8$\times 10^6$ cm/sec 정도이다.

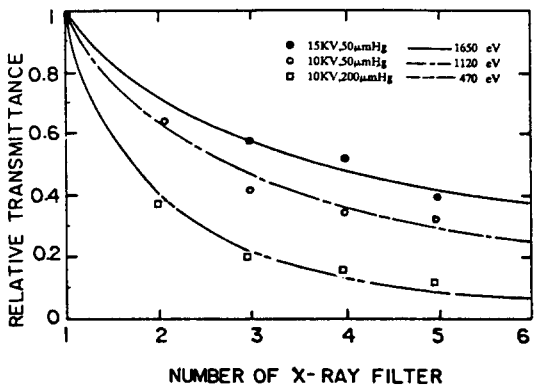

Fig. 7. The relative transmittance of X-ray filter with numbers. The solid lines are calculated from equation (3) to best fit the experimental points.

2. Collapase phase에서 전자온도 측정

플라즈마 전자온도는 Maxwellian 전자속도 분포를 가정하여 플라즈마로부터 방출되는 연속 X-선의 상대적인 투과세기로부터 측정된다. 간단히 동일한 금속필터의 장 수를 변화시키면 필터의 두께에 따른 상대적인 투과세기를 측정하여 이를 이론식에 fitting하면 플라즈마의 주요 변수인 전자온도를 구할 수 있다. N을 필터의 장수, T_e를 플라즈마 전자온도, T_r을 상대적인 X-선 투과세기라고 하면 이들의 표현은 다음과 같다.

$$T_r=\frac{\int_0^\infty \exp(-\frac{h\nu}{kT_e})\exp(-\alpha_\nu N)\,d\nu}{\int_0^\infty \exp(-\frac{h\nu}{kT_e})\,d\nu} \tag{3}$$

그림 7은 상대적 X-선 세기의 실험치에 위 식을 최소

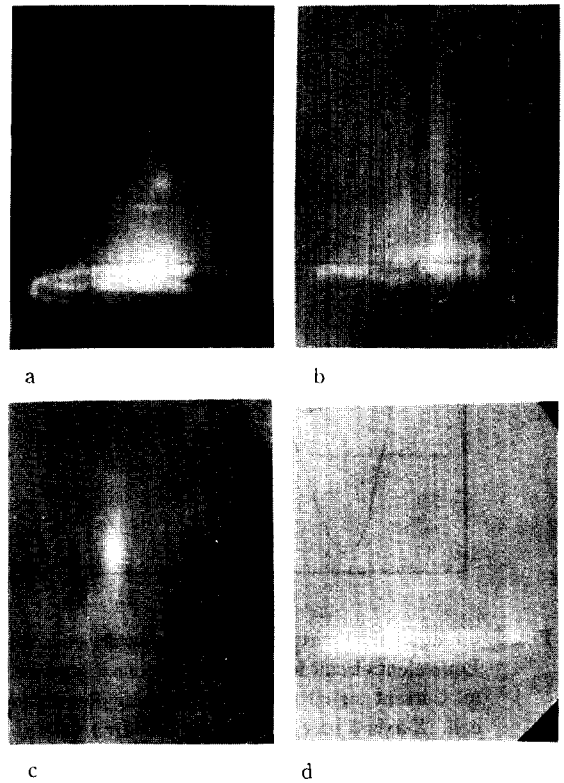

Fig. 8. X-ray photographs of focus region for various experimental results. (a), (b), (d) are not focussed state, which show x-ray emission around the center electrode. (c) shows good plasma focus state.

자승법으로 fitting하여 플라즈마 전자온도 T_e를 구하였다. 충전전압 15 kV와 10 kV, 충전 Ar gas 압력 50 μmHg와 200 μmHg에서 실험한 상대적 투과도와 잘 일치하는 전자온도가 나타나며 각각 470 eV와 1650 eV로 밝혀졌다. 여기서 X-선 세기의 측정기로써는 X-선 필름을 사용하였다.

3. 집속된 플라즈마의 크기 측정

집속된 플라즈마의 크기는 X-선 pin-hole 카메라를 제작하여 측정하였다. pin-hole의 크기가 300 μm인 pin-hole 카메라에 X-선 필터(mylar 8 μm+Al 36 nm)를 붙여서 플라즈마로부터 발생되는 가시광선 및 자외선은 차단시키고 X-선 image만을 관찰하였다. 그림 8은 focus 영역에서의 찍은 X-선 image이다. 그림에서 나타나듯이 전자의 운동방향은 outer electrode에서 center electrode로 모여들게 되어 center electrode의 윗면에서 집속되므로 이 부분에서 가장 강력한 X-선이 방출된다. 집속된 플라즈마는 직경 3 mm, 길이 3 cm의 강한 X-선을 내는 플라즈마와 직경 1.7 cm, 길이 3 cm의 플라즈마의 크기로 되어있다.

V. 결 론

최대 10 kJ의 energy를 공급할 수 있는 Mather type plasma focus system을 설계 제작하여 그 전기적 특성과 플라즈마의 집속에 대해 X-선 진단 및 방전전압, 전류상태를 측정함으로써, X-선 리소그래피, X-선 마이크로스코피에의 응용을 위한 광원으로서의 가능성을 보았다.

플라즈마 집속장치의 전기적 회로특성을 이해하기 위해 Rogowski 코일을 제작하여 회로 저항과 회로 인덕턴스가 각각 20 mΩ과 0.2 μH임을 얻었고 방전전압을 측정하여 방전인덕턴스, 역학적에너지, 자기에너지를 각각 시간의 함수로 계산하였다. 이와 함께 collapse phase에서 자기 에너지를 플라즈마 에너지로 변화하는 것은 플라즈마 전류 sheath가 가속 phase에서 어떤 속도로 이동하는지를 알기 위해 충전전압과 Ar gas의 압력에 따라 플라즈마가 집속되는데 걸리는 시간을 측정하여 플라즈마 전류 sheath의 이동속도는 $P^{-0.25} \times V^{0.38}$에 비례함을 알았고 그 크기는 약 $4 \sim 8 \times 10^6$ cm/sec였으며 플라즈마 에너지로의 최대변화 효율은 플라즈마 전류 sheath 속도가 7×10^6 cm/sec 정도가 되도록 충전전압과 Ar gas 압력을 조절해야 할 것으로 생각된다.

또 플라즈마가 집속되는 지점의 전자온도는 집속될 때 이온화된 전자들로부터 방출되는 연속 X-선의 필터의 두께에 따른 상대적인 투과세기를 측정함으로써 460 eV에서 1600 eV의 높은 온도로 가열됨을 알 수 있다. 특히, 플라즈마 전자온도는 플라즈마 집속의 유무에 크게 관계하는 것으로 나타났고 플라즈마 집속의 일어나는 조건은 breakdown phase에서의 초기 방전상태에 의해 결정되는 것으로 생각된다.

집속된 플라즈마의 크기는 X-선 pin-hole 카메라로 측정한 결과 1.7 cm의 직경과 3 cm 길이 정도로 넓게 분포된 플라즈마의 직경 3 cm 정도의 강한 X-선을 방출하는 플라즈마를 관측할 수 있었고 전자가 center electrode에 충돌하여 방출되는 X-선도 관측할 수 있었다. 앞으로 D_2 gas를 충전 gas로 사용할 때 빠른 전자군 발생과 중성자의 검출 등이 예상되고 리소그래피나 마이크로스코피에의 X-선 광원으로서의 응용이 기대되고 있다.

참 고 문 헌

[1] L. A. Artsimovich, Controlled Thermonuclear Reactions, Gordon and Breach, N. Y. (1964).

[2] J. W. Mather, Methods of Experimental Physics part B, Chap. 15, N. Y. (1971).

[3] J. W. Mather, Phys. Fluids, 8(2), 336 (1965).

[4] S. L. Leonard, Plasma Diagnostics Techniques, Academic Press, N. Y. (1965).

[5] H. R. Griem, Plasma Spectroscopy, Mc-Graw-Hill, N. Y. (1964).

[6] K. V. Robert and D. E. Potter, Methods in Computational Physics, Academic Press, N. Y. (1970).

Fabrication and Characteristics of Mather Type Plasma Focus System

D.H. Kim, S.S. Lee
Korea Advanced Institute of Science and Technology

S.K. Cho
Korea Institute of Science and Technology

G.U. Kim
Korea Standards Research Institute

M.H. Lee
Department of Physics, Inha University

(Received; February 7, 1990)

Mather type plasma focus system is designed and fabricated, and its electrical behaviors and the characteristics of the plasma are investigated. The discharge current is measured with a Rogowski coil, and the external resistance and inductance of the system are found to be 20 mΩ, 0.2 uH, respectively from the measured voltage signals and current signals, and discharge inductance, magnetic, and mechanical energy are calculated. The speed of the plasma current sheath in the acceleration phase is found to vary as $P^{-0.25} \times V^{0.38}$ and its value is about is 10^6 cm/sec. The electron temperature in the plasma is determined from the measurement of the X-ray transmittance with the number of X-ray filters and its value is found to be about 1 keV. The size of plasma, measured using X-ray pin-hole camera, is about 17 (dia.) x 30 (length)mm^2.