

펄스형 방전플라스마에서 발생하는 X선 측정

최운상, 문병연*, 곽호원*

부산여자대학 안경광학과

경운대학교 안경광학과*

(2006년 8월 16일 받음, 2006년 10월 2일 수정본 받음)

플라스마 포커스장치에서 방사되는 전자기파 중에서 X선에 대한 특성을 조사하였다. X선 측정은 pin 포토다이오드와 0.5mm 핀홀카메라로 이루어졌으며, X선 이외의 전자기파를 차폐하기 위해 25 μ m 베리튬박막을 사용하였다. X선 발생조건은 방전전압이 15kV이었고, 아르곤 기체압력은 0.12torr 이었다. X선 발생의 재현성이 조사되었고, 방사되는 X선의 온도는 3keV 이상이었다.

주제어: X선, 플라스마 포커스, 포토다이오드, 핀홀카메라

I. 서론

X선을 방사(radiation)하는 여러 가지 원천(Source) 중에서 플라스마 상태에서 방사하는 X선은 X선 세기(Intensity)를 플라스마 상태유지를 위한 외부 변수로서 조절할 수 있는 장점이 있다. 플라스마 상태는 기체상태보다 온도가 높은 이온화 된 물질상태로서 온도에 따라 저온 플라스마 와 고온 플라스마로 나눌 수 있다. 형광등과 같이 연속으로 빛을 방사할 수 있는 낮은 온도의 상태로 구성된 것이 저온플라스마이며, 번개처럼 순간적(pulse)으로 빛을 방사하는 높은 온도의 상태로 있는 것이 고온플라스마이다. 플라스마에서 방출(emission)하는 빛은 우리가 눈으로 볼 수 있는 가시광선영역 뿐만 아니라 마이크로파에서 부터 X선 영역까지 전자기파의 전 파장영역 걸쳐서 방사된다.^[1]

펄스형 고온플라스마장치는 주로 전기에너지를 이용하여 플라스마를 발생시킨다. 축전기에 전기에너지를 저장한 후 방전관 내의 기체에 대해 에너지를 펄스방전시키는 것으로 이 때 순간적으로 플라스마가 발생하며, 플라스마로부터 여러 종류의 전자기파가 방사된다. 이 중에서 X선

도 같이 방사되는데, 플라스마에서 발생하는 X선은 발생 위치나 방전전압의 크기 등에 영향을 받아 낮은 온도의 soft X선과 높은 온도의 hard X선으로 구분이 된다. 높은 세기의 X선을 얻기 위한 방법으로 고전압의 사용이 우선이지만, 방전관내의 기체 종류 및 기체압력 또한 X선의 방사에 변수가 되기 때문에 적절한 기체사용과 방전전압의 변화에 따른 방사광의 특성 연구가 필요로 한다.

본 연구는 펄스형 플라스마 포커스(Plasma Focus)장치에서 아르곤 기체에 대해 방사하는 X선을 PIN 포토다이오드(photo diode)와 핀홀카메라(pinhole camera)로 분석하였다.^[2-4] X선 방사에 대해 포토다이오드는 시간분해 분석법(time-resolved method)으로 유용하며, 핀홀카메라는 시간적분 분석법(time-integrated method)으로 유용하다. 또 두 가지 측정법을 동시에 사용하여 이 장치에서 발생하는 X선 방사의 특성을 조사하였다.

II. 실험장치 및 방법

플라스마포커스장치의 전기에너지 공급부는 최대 40kV의 전원공급장치(power supply)가 축전지(capaci-

tor bank)에 전력을 공급하며, 축전지는 6 μ F/ 40kV의 축전지 4개가 병렬로 연결되어 최대 19.2kJ까지 에너지를 공급할 수 있다. 방전점화를 위한 스위치로는 역핀치 스위치(Inverse Pinch Switch)가 사용되었다.¹⁵⁾ 포커스 장치의 방전시 방전기체로는 아르곤(Ar)을 사용했다. 아르곤은 진공용기의 압력을 기본진공영역(10^{-6} torr)까지 진공펌프(Varian VHS-4)로 낮춘 후 실험 압력까지 충전되었다.

X선의 측정은 포토다이오드와 핀홀카메라로서 이루어졌다. 플라스마 포커스장치의 진공용기는 옆면 4곳과 위쪽으로 창이 있는데, 옆면 창에는 포토다이오드를 설치하여 시간변화에 따른 X선 발생을 관찰하였으며, 옆면 한 곳과 위쪽 창에는 핀홀카메라를 설치하여 전체적인 X선 발생모양을 관찰하였다. 그림 1에 장치의 개략도가 있다.

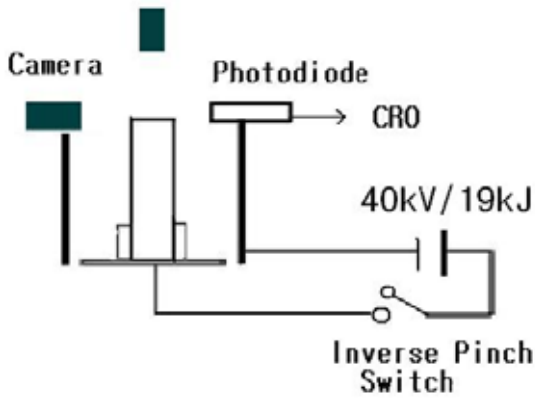


Fig. 1. Schematic diagram of the pulsed plasma focus device.

PIN 포토다이오드(Hamamatsu S1777-02, photo-sensitive surface; 4.1mm)는 자외선과 가시광선에 대해 반응특성을 가지지만 포토다이오드의 창을 제거하면 X선에도 반응하는 특성을 이용하였다. soft X선은 공기에 흡수되는 성질을 감안하여 진공상태에서 X선이 포토다이오드에 입사되어 측정이 되도록 구성하였다. 또한 플라스마 포커스장치에서 X선뿐만 아니라 자외선과 가시광선도 같이 발생하기 때문에 X선만의 측정을 위해서는 자외선 및 가시광의 방사를 차단하는 것이 필요하다. 이와 같이 X선만을 통과시키기 위해서는 얇은 금속박막을 사용하는데, 이 실험에서는 25 마이크로미터 두께의 베릴륨(Be) 박막을 사용하였다. 포토다이오드에서 검출된 X선 신호는 오실로스코프를 통해서 읽었다. X선은 펄스형태로 발

생하기 때문에 마이크로초 이하의 시간에 반응하는 포토다이오드를 이용해야 정확한 X선의 발생을 시간별로 분석할 수 있다. 이 실험에 사용된 포토다이오드는 100V의 역(reverse) 전압일 때 1nano초의 반응시간(rise time)을 가진다. X선 방사 실험에 사용되는 포토다이오드는 짧은 시간의 반응성뿐만 아니라 세기에 변화에 따른 안정성이 있어야 한다. 역 전압을 함수로 포토다이오드의 선형성을 조사한 것이 그림 2에 있다. 그림처럼 역전압이 증가함에 따라 포토다이오드가 선형적으로 반응함으로서 안정된 측정값을 얻을 수 있다.

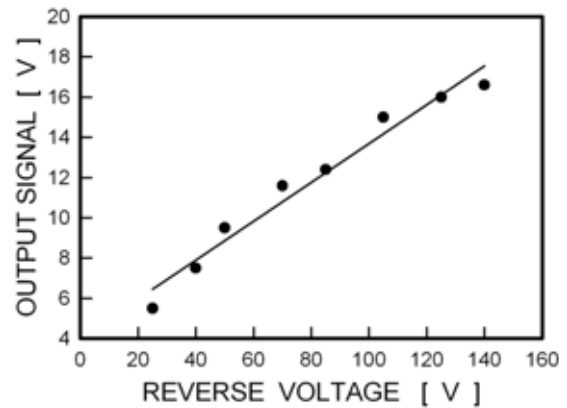


Fig. 2. photodiode linearity tests along reverse voltage.

핀홀카메라는 X선 발생원에 직접 X선 필름을 노출시킴으로서 X선의 발생모양을 시간적분된 형태로 관찰할 수 있다. 핀홀의 크기가 0.5mm인 핀홀카메라는 X선 발생원에 대해 반경방향으로 설치되어 발생모양을 관찰한다. 반경방향 측정은 핀홀을 기준으로 내부전극중심과 초점거리가 1:1되는 위치에 설치되었으며, 내부전극표면과 4°의 각도가 이루어졌다. 또 X선이 충전기체에 의해 흡수됨을 감안하여 장치와 같은 진공분위기에서 측정이 이루어지도록 하였다. X선의 상은 X선 필름(Fuji #400 industrial)을 사용하여 직접노출방법으로 얻었고, 현상은 X선 현상액과 고정액(부흥 Co.)을 사용하여 25°C일 때 100초의 시간 동안 현상하고, 80초의 시간 동안 정착하였다. 측정에 사용된 포토다이오드와 핀홀카메라의 구성이 그림 3의 (a)(b)에 있다.

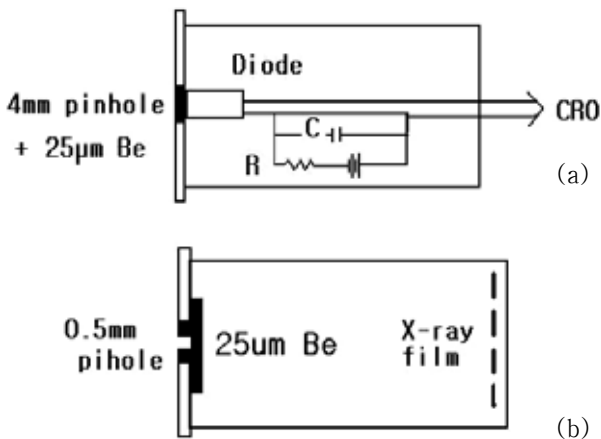


Fig. 3. Cross section of the photodiode chamber (a) and the pinhole camera (b).

III. 실험결과

X선의 발생은 방전전압 15kV와 0.21torr의 아르곤압력에서 이루어졌으며, 포토다이오드와 핀홀카메라가 동시에 X선을 측정하였다. 포토다이오드로 측정된 X선의 신호를 시간에 대한 변수로 나타낸 것이 그림 4에 있다. 또한 그림에는 3번의 거듭된 방전에서 발생된 각각의 X선 신호가 나타나 있다. X선은 모든 신호가 발생후 0.25µs에 최대값을 가지고 이후에 1µs 동안 발생하고 있다.

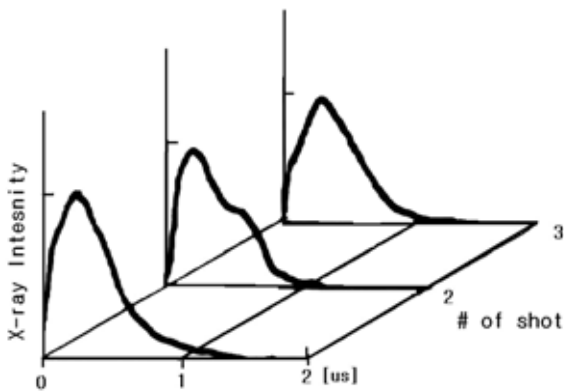


Fig. 4. X-ray signal by the photodiode with absorbers of a 25 µm Be foil at 15 kV and 0.21 torr Ar.

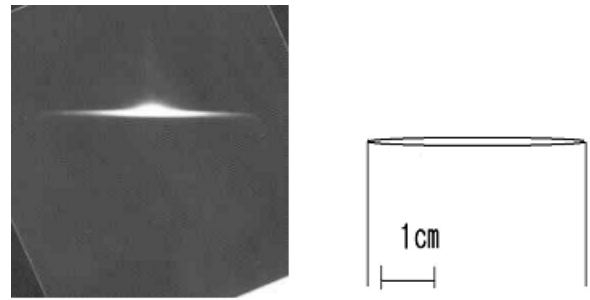


Fig. 5. X-ray pinhole picture of 3 shots and the shape of center electrode

3번의 방전 동안 최대값은 비슷한 시간대를 가지고 있으나 X선의 신호모양은 조금씩 변화되어 있다. 이것은 펄스 플라스마의 방전 때마다 장치전체의 저항에 변화가 생겨서 나타나는 현상으로 예측된다. 즉 방전이 거듭됨으로서 구리로 구성된 전극의 표면 거칠기나 두 전극사이에 있는 절연체 표면이 불순물의 영향 때문에 표면저항이 일정치 않아서 나타나는 현상으로 예측된다. 이 장치가 시간적인 재현성이 요구되는 X선 발생원으로서로는 가능하겠으나, X선의 발생세기나 전체 시간동안 적분된 X선의 발생원으로서로는 정확한 재현성이 요구되는 연구가 필요로 하겠다. X선 발생시간동안 적분된 X선의 모양은 핀홀카메라 사진을 통해 볼 수가 있다. 그림 5는 전극의 반경방향에서 측정된 핀홀카메라 사진으로 그림에 본래 전극모양과 크기가 함께 있다. 그림에서 X선은 주로 전극 위 표면에 발생되며, 원기둥 모양의 전극 중심에서 가장 세기가 높게 나타난다. 또 전극중심에서는 전극표면뿐만 아니라 전극위의 공간 중에서도 X선이 발생하고 있다. 이 실험을 통해서 발생된 X선의 온도를 측정하기 위해 X선 필름을 이중으로 겹쳐서 실험하였고, 이 필름에 흡수되는 X선의 세기를 통해 X선의 온도를 계산할 수 있다. X선방사에 의한 세기 I_0 와 필터로부터 투과된 세기 I 와의 관계는 (1) 식으로 주어진다.^[8]

$$I = I_0 \exp(-\mu t) = I_0 \exp(-(\mu/\rho)\rho t) \quad (1)$$

여기서 μ 는 필터의 흡수계수이며, t 는 필터의 두께이고, μ/ρ 는 필터의 질량흡수계수이다. μ/ρ 는 입사 X선의 파장과 필터의 질량수 함수로서 (2) 식과 같이 주어진다.

$$\frac{\mu}{\rho} = C\lambda^3 - L\lambda^4 + \frac{\sigma_e Z N_o}{A} \quad (2)$$

여기서 C, D는 입사 X-선의 파장과 필터의 질량수에 따른 계수이며, σ_e 는 전자당 산란계수이고, N_o/A 는 그 램당 원자수이다. 폴리에틸렌이 지지층으로 구성된 X선 필름에서 필름의 두께 0.175 mm에 대해 투과된 X선을 감안하여 X선의 온도를 계산하면 3keV 이상이 된다. 일반적으로 플라스마 포커스 장치에서 발생하는 X선은 전극표면에서는 hard X선이 발생되며, 전극중심의 공간에서는 soft X선이 발생하는 것으로 보고되고 있다.^[9] 본 실험에서도 전극표면과 전극중심의 공간에 같은 현상이 나타나고 있다.

IV. 결 론

펄스형 고온 플라스마 장치에서 발생하는 X선을 포토 다이오드와 핀홀카메라로 측정하였다. X선 신호는 시간적인 재현성은 확인되었으나, 전체적인 신호변화는 방전할 때마다 장치저항의 변화로 재현성이 완전하지 못하였다. 플라스마 포커스 장치에서 발생하는 X선은 전극표면과 중심전극 위 공간에서 발생하는데, 본 장치에서도 마찬가지로의 X선 발생을 관찰하였으며, 공간에서 발생된 X선은 3keV 이상의 온도를 갖는 것으로 측정되었다.

참고문헌

- [1] F.F. Chen, Introduction to plasma physics and controlled fusion, Plenum press, New york, pp.1-52(1974).
- [2] J.W.Mather, Methods of Experimental Physics, vol. 9B, Academic Press, New York, p.187 (1971).
- [3] H. Kelly and G. Giudice, IEEE Plasma Science, 18:646-651(1990).
- [4] R. S. Post, Phys. of Fluids 17:452-457(1974).
- [5] J. H. Lee and M. D. Williams, Bull. Am. Phys. Soc. 22:1211(1977).
- [6] 최운상, 정수자, 김용훈, 장준규, 정정부, 신장철, 한국안광학회지, 5(2):163-165(2000).
- [7] Woon Sang Choi and Duck Kyu Park, Jpn. J.

Appl. Phys. 38: 913-917(1999).

- [8] J. A victoreen, J. App. Phys. 20:1141-1149 (1949).
- [9] D. Dietz, J. Appl. Phys. 62:2669-2675(1987).

X-ray Radiation from Pulsed Discharge Plasma

Woon-Sang Choi, Byeong-Yeon Moon*, and Ho-Won Kwak*

Department of Ocular Optics, Pusan Women's College

Department of Visual Optics, Kyungwoon University*

(Received August 16, 2006 : Revised manuscript received October 2, 2006)

We investigated X-ray radiated from the pulsed Plasma Focus device that translated from electric energy into electromagnetic wave by electric discharge. X-ray radiation is analysed by using pin photodiode and 0.5mm pinhole camera shielded by 25 μm Be. The condition of X-ray radiation was that the discharging voltage was 15 kV and the working gas were 0.12 torr Argon. Reproducibility of X-ray radiation is investigated and X-ray temperature is calculated above 3keV.

Key words: X-ray, plasma focus, photodiode, pinhole camera