

펄스형 방전플라스마 장치에서 반경방향 Current Sheath의 속력

최운상 · 장준규*

부산여자대학 안경광학과, *가야대학교 안경광학과
투고일(2008년 7월 19일), 수정일(2008년 8월 10일), 게재확정일(2008년 9월 10일)

목적: 펄스형 방전플라스마 포커스 장치에서 반경방향 플라스마 current sheath의 속력을 측정하였다. **방법:** 측정에는 시간분해 분광분석법과 로고프스키 코일이 사용되었다. **결과:** 15 kV의 방전전압과 수십 torr의 He과 Ar의 기체기압에서 10^5 cm/s의 속력이 측정되었으며, 기체기압이 증가할수록 current sheath의 속력은 감소되었다. **결론:** 최적조건인 수 torr의 기압에서는 10^7 cm/s의 속력이 나올 것으로 예상된다.

주제어: 플라스마 current sheath, 시간분해 분광분석법, 로고프스키코일

서 론

펄스형 플라스마 발생장치는 축전지에 전기에너지를 저장하였다가 10^{-6} 초의 짧은 시간에 방전시켜 플라스마를 발생시키는 장치이다. 이때 발생하는 플라스마는 수 천도 이상의 온도를 가지며, 마이크로파로부터 x-선에 이르기까지 다양한 광방사가 일어나게 된다. 광방사는 어느 파장대의 광을 목적으로 하는가에 따라 발생조건을 변화시킬 수가 있는데, 발생조건의 변수는 방전시 방전전압과 축전지에 충전되는 에너지에 영향을 받게 된다. 플라스마 발생 기술은 고에너지의 광원이 필요로 하는 어떠한 산업현장에서도 응용될 수 있다^{1,2}.

펄스형 플라스마 발생장치 중 플라스마 포커스장치는 원통형의 두 개의 전극사이에 방전이 일어나서 current sheath(CS)에 의해 플라스마가 발생하는 것으로 초기방전은 원통형 전극사이에 있는 절연체의 표면을 따라 CS가 형성되며, 이후 $J \times B$ 로 형성되는 힘의 영향을 받아 CS가 전극이 열린방향으로 가속되고, 가속 후 원통이 끝나는 부분에서 원통의 중심부분으로 CS가 집중(focus)되어 고온, 고밀도의 플라스마를 형성한다. 이러한 고온, 고밀도의 플라스마 형성은 CS의 운동에 의해 영향을 받게 되는데, 안정되고 빠른 CS의 형성이 필수 불가결한 조건이 된다. CS가 초기 방전 후 열린방향으로 가속되는 것을 축방향 운동이라 하며, 이후에 원통 끝에서 원통중심으로 모이는 것을 반경방향 운동이라고 한다^{3,5}. 본 연구는 펄스형 플라스마 포커스 장치에서 반경방향의 CS 속력을 측정하였다.

시간분해 분광분석법을 이용하여 측정하였으며, 로고프스키(Rogowski) 코일을 동시에 사용하여 측정된 속력을 비교하였다. CS의 속력측정은 안경렌즈를 코팅하는 진공방전 증착장치에서 코팅입자인 플라스마입자를 제어하는데 기초자료로 활용될 것이다.

실험 장치 및 방법

플라스마 포커스 장치는 원통형인 두 개의 구리전극으로 구성되어 있으며, 전극사이는 세라믹 절연체로 절연되어 있다. 가운데 전극은 직경이 5 cm이며 외부전극은 10 cm이다. 포커스장치의 방전시 방전기체로는 파장대 추적 이 쉬운 아르곤(Ar) 기체와 헬륨(He) 기체를 각각 사용했다. 기체는 진공용기의 압력을 기본진공영역(10^{-6} torr)까지 진공펌프(Varian VHS-4)로 낮춘 후 실험 압력까지 기체를 충전시켰다. 이 장치의 진공용기는 옆면에 창이 있으며, 이 창을 스테인레스 주름관으로 분광기와 연결하였다. 방출되는 광선은 Czerny-Turner mounting spectrometer($f = 0.5$ m)를 사용하여 1200 g/mm의 그레이팅(grating)으로 분광시켰다^{6,9}.

측정은 Fig. 1과 같이 구성된 시간분해 분광 분석법을 사용하였다. 시간분해 분광 분석법은 스펙트럼세기의 시간 의존성을 측정하는 방법으로 빛을 증폭시켜 측정하는 광증배관(Photo Multiplier Tube, Hamamatsu, R212)에서 측정된 광을 오실로스코프로를 이용하여 시간분해되는 신호로 측정하였다. 로고프스키 코일은 전극이 열린 쪽 위에

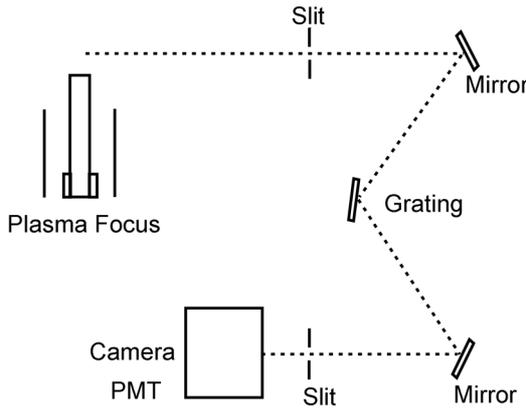


Fig. 1. Schematic diagram of Plasma Focus Device and Spectrometer using as detector of light pulse.

가장자리와 중심에 각각 설치하였다. 로고프스키 코일 신호는 RC 적분회로를 거쳐 오실로스코프로 측정하였으며, 저항과 콘테서의 곱의 값인 시정수는 $18 \mu s(10 \text{ k}\Omega \times 0.018 \mu F)$ 이다.

실험 결과

반경방향 CS의 속력을 측정하기위해 진공용기의 옆 창을 통하여 방출되는 빛을 분광기와 광증배관으로 시간 분해된 방전특성을 측정하였다. 방전기압 5 torr에서 100 torr까지 아르곤 기체에서 측정된 플라즈마의 방사 특성이 Fig. 2에 있다. 분광기에서 측정된 파장은 3028 \AA 이며, 방전전압 15 kV에서 측정이 이루어졌다. 실험결과에서 기체의 기압이 낮을 경우에는 초기에 하나의 최대점이 나타나지만, 기압이 증가할수록 두 개의 최대점이 뚜렷하게 나타나고 있다.

Fig. 2에서 각 신호아래의 숫자는 전체세기를 비교하기 위하여 신호아래 면적을 적분한 값들로서 이 값을 기체압력을 변수로 전체세기의 변화를 나타낸 것이 그림 3에 있다. 그림 3에서 기압이 증가함에 따라 전체세기가 지수함수적으로 일정하게 감소하는 것으로 나타난다. 이 현상은

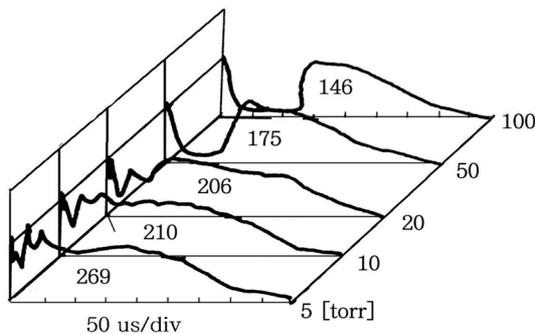


Fig. 2. Spectral intensity and the dependence optical pulse shape on the Argon pressure.

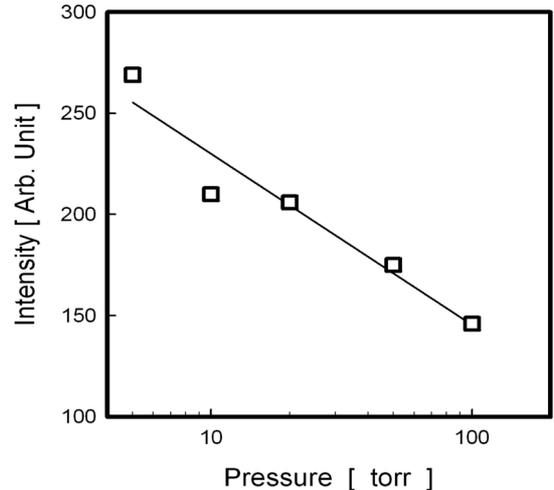


Fig. 3. Spectral intensity as a function of the Argon pressure for the plasma focus device.

기압이 증가함에 따라 일정한 에너지에서 운동하는 기체의 입자가 증가하여 CS의 운동 속력이 늦어지는 것으로 해석할 수 있다. 기압변화에 대한 방사세기는 지수함수적으로 반비례하는 것을 알 수 있는데, 광방사는 연속스펙트럼과 선스펙트럼으로 구성되며, 연속스펙트럼은 제동복사 (free-free radiation)와 재결합방사 (free-bound radiation)에 의한 것이며, 선스펙트럼은 bound-bound radiation에 의한 것이다!

Fig. 2에서 나타나는 두 최대점사이의 시간간격을 이용하여 반경방향 CS 평균속력을 계산할 수 있다. Fig. 2에서 5 torr 이후의 신호에 나타나는 두 개의 최대점에 대해, 첫 번째 최대점은 분광기로 유입되는 빛의 위치로 가정할 때 양극의 끝부분까지 올라온 CS로부터 방출되는 빛의 신호이고, 두 번째 최대점은 플라즈마가 집중되면서 방출하는 빛임을 가정할 수 있다. 이것을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 CS로부터 방출하는 빛과 플라즈마 집중으로부터 방출하는 빛을 각각 교대로 차단시켰다.

이 방법으로 측정된 결과, 각 최대점의 신호를 뚜렷하게 구별할 수 있었다. Fig. 4의 (a)는 모두 개방하여 전과정을 측정한 것으로 두 개의 최대점이 나타났으며, (b)는 CS에서 방출하는 빛을 차폐시켜 플라즈마가 집중될 때의 방사만을 측정하였고, (c)는 반대로 집중될 때 방출하는 빛은 차폐시키고 CS만의 방사를 각각 측정한 것이다. 따라서 두 최대점은 Fig. (c)처럼 CS의 발생에 의한 최대점과 Fig. (b)처럼 플라즈마 집중에 의한 최대점으로 볼 수 있고, 두 최대점 사이의 시간간격으로부터 가운데 전극의 반경 2.5 cm를 감안하여 CS의 평균속력을 계산할 수 있다. 파장이 6328 \AA 과 3028 \AA 인 경우에 Ar 기체에 대하여 측정하였고, 그리고 3028 \AA 인 경우에 He 기체들에 대하여 기압변화에 따라 평균속력을 측정하였다. He 기체의 경우

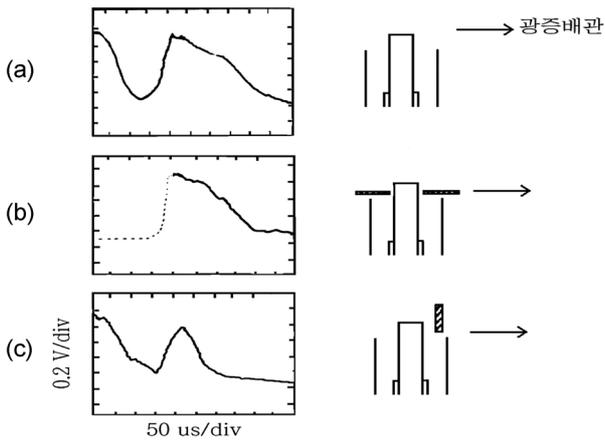


Fig. 4. (a) Plasma current sheath radiation and focus radiation at 5 torr Ar pressure and discharging voltage of 15 kV, wavelength 3028 Å. (b) Plasma focus radiation with sheath shielded. (c) Plasma current sheath radiation with the focus shielded.

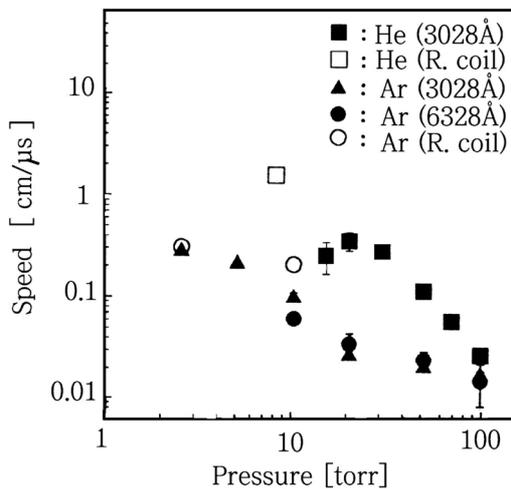


Fig. 5. The dependence of radial current sheath speed on the Ar and He pressure at the discharging voltage of 15 kV.

15 torr 이후부터 두 최대점이 나타났다. 또 이들 결과와 비교하기 위하여 로고프스키 코일로 He 기체와 Ar 기체 일 때에 측정된 속력을 Fig. 5에 함께 나타내었다. Ar은 He에 비해 밀도가 10배 정도 크기 때문에 CS의 평균속력은 약 0.3배 작게 나타난다. 측정된 3~100 torr의 기압범위에서 평균속력은 10^5 cm/s 정도인데, He의 경우 1 torr 보다 작은 값으로 외삽(extrapolation)할 때 10^7 cm/s가 되어

일반적인 플라스마 포커스 장치에서 측정된 반경방향 CS 속력측정과 비슷한 값을 보인다³.

결론

펄스형 방전 플라스마 포커스 장치에서 CS의 반경방향 속력을 측정하였다. 반경방향의 운동은 축방향 운동이 끝난 후에 양극위에서 플라스마가 집중을 하기위해서 일어나는 운동으로 축방향 운동 속력에 따라 플라스마 집중의 효과를 기대할 수 있다. He와 Ar 두 기체에 대해 시간분해 분광분석법으로 측정하였으며, 로고프스키 코일을 사용하여 비교하였다. 측정결과와 3~100 torr의 기압범위에서 10^5 cm/s의 속력이 계산되었으며, 플라스마 포커스의 집중이 일어나는 최적조건으로 예상되는 1 torr의 기압에서는 10^7 cm/s로 예상된다. 이와같은 플라스마에서 CS의 속력측정은 안경렌즈의 코팅방법인 진공증착법에서 플라스마 마입자를 제어하여 코팅의 특성을 결정짓는 기초자료로 활용될 것이다.

참고문헌

1. Chen, F. F., "Introduction to plasma physics and controlled fusion", Plenum press, New york, pp. 1-52(1974).
2. Mather, J. W., "Methods of Experimental Physics, vol. 9B", Academic Press, New York, pp. 187(1971).
3. Kelly, H. and Giudice, G., "Kinematics and Structure of a Plasma-Focus Current Sheath During its Radial Implosion Stage", IEEE Plasma Science, 18(3):646-651(1990).
4. Hart, P. J., "Modified Snowplow Model for Coaxial Plasma Accelerators", J. of Applied Physics, 35(12):3425-3431(1964).
5. Lee, J. H. and Williams, M. D., "UV Emission from the Metal Plasma in a Plasma-Focus Apparatus", Bull. Am. Phys. Soc., 22:1211(1977).
6. 최운상, "펄스형 방전플라스마에서 발생하는 가시광선의 분광특성", 한국안광학회지, 3(1):27-31(1998).
7. 최운상, 정수자, 김용훈, 장준규, 정정복, 신장철, "펄스형 방전플라스마에서 발생하는 가시광선의 분광(II)", 한국안광학회지, 5(2):163-165(2000).
8. 최운상, 문병연, 곽호원, "펄스형 방전플라스마에서 발생하는 X선 측정", 한국안광학회지, 11(4):311-315(2006).
9. 최운상, 최호성, "펄스형 방전플라스마 장치에서 current sheath의 속력", 한국안광학회지, 12(1):69-74(2007).

Radial Speed of Current Sheath in Pulsed Discharge Plasma Device

Woon Sang Choi and Jun Kyu Jang*

Department of Ophthalmic Optics, Busan Women's College

*Department of Ophthalmic Optics, Kaya University

(Received July 19, 2008; Revised August 10, 2008; Accepted September 10, 2008)

Purpose: The radial speed of plasma current sheath was measured at the plasma focus apparatus. **Methods:** The measurement was used to time-resolved spectroscopic method and Rogowski coils. **Results:** Radial current sheath speed was measured with 10^5 cm/s at Helium and Argon pressure between 5 to 100 torr and discharging voltage of 15 kV. When the gas pressure was increased, the current sheath speeds were decreased. **Conclusions:** At the optimum condition of plasma focus apparatus, the radial speed is guessed 10^7 cm/s as a results of the measurement of current sheath speed.

Key words: plasma current sheath, time-resolved spectroscopic method, Rogowski coils