

펄스형 방전플라스마 장치에서 current sheath의 속력

최운상, 최호성

부산여자대학 안경광학과

(2006년 12월 5일 받음, 2007년 1월 15일 수정본 받음)

펄스형 방전플라스마장치에서 축방향 플라스마 curren sheath의 속력을 측정하였고, snowplow 모델과 비교하였다. Current sheath의 속력은 10^6 cm/s로 측정되었다. 측정된 속력 중에서 가벼운 기체인 수소와 헬륨은 모델의 이론과 비슷한 결과가 나왔으나 무거운 기체인 아르곤은 이론과 조금 벗어났다. 그 이유는 current sheath의 불안정성 때문으로 추정된다.

주제어 : 플라스마 current sheath, 로코프스키코일, snowplow 모델

I. 서론

펄스형 고온플라스마 발생장치는 전극의 구조에 따라 플라스마를 발생시키는 방법이 달라진다. 플라스마 포커스 장치는 두 개의 원통모양으로 전극이 구성되어 있으며, 이러한 구조는 플라스마입자의 핀치현상을 유도하게 되어 핀치 후에는 높은 플라스마 온도와 밀도를 형성하게 되고, 이로부터 마이크로파부터 적외선, 가시광선, 자외선, X-선 등의 광방사가 있게 된다. 핀치의 형성은 초기 방전후에 만들어지는 Current Sheath (CS)에 크게 영향을 받게 된다. 초기에 두 전극사이에서 만들어지는 CS는 두 전극의 열린방향으로 가속되고, 이후 내부 전극 위에 CS가 초점이 맺어짐으로서 높은 밀도와 온도의 플라스마를 만들게 된다. CS를 가속시키기 위해서는 고전압의 사용이 우선이지만, 방전관내의 기체 종류 및 기체압력 또한 변수가 되기 때문에 적절한 기체 사용과 방전전압의 변화에 따른 연구가 필요로 한다 [1-7].

본 연구는 펄스형 플라스마 포커스(Plasma Focus) 장치에서 CS의 속력에 대한 모델을 만들고, 다른 모델들과 비교하여 계산하였다. 또 장치 내에 CS가 가속되는 구간에 두 개의 로코프스키코일(Rogowski coil)을 설치하여 속력을 측정하였다. 플라스마 형성에 사용된 기체는 수소, 헬륨, 아르곤으로서 각 기체의 질량을 고려하여 CS의 속력이 계산되었고, 측정치와 비교되었다.

II. 이론

1. 플라스마 포커스장치의 동작원리

플라스마포커스 장치는 방전후에 네가지 단계로 나누어 플라스마 형성과정을 논의할 수 있다. 첫번째는 최초방전에 의해 절연파괴가 일어나는 과정으로 고전압펄스형 스위치에 의해 축전지에 저장된 전기에너지가 내부전극과 외부전극사이에 걸쳐있는 절

연체를 따라 방전이 일어나는 과정이다. 절연체는 불순물이 적고, 온도의 변화에 영향이 없는 것이어야 하는데, 주로 석영유리나 파이렉스유리, 세라믹이 사용되고 있다. 절연과피 과정에서 생겨나는 CS는 여러 겹의 방사형 필라멘트모양 구조를 가지고 있다. 이 과정은 CS가 내부전극 중심위에서 플라스마 초점이 형성되면서 발생하는 광방사 현상에 중요한 역할을 한다.

두번째는 두 전극사이의 절연체에서 형성된 CS가 가속되는 과정으로서 CS는 역핀치의 원리에 따라 절연체표면에서 밀려나와 전류밀도 J 와 자기장 B 가 결합된 $J \times B$ 힘인 로렌츠힘에 의해 나아가게 된다. 즉,

$$\begin{aligned} \vec{J} \times \vec{B} &= \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \\ &= \frac{B^2 k}{\mu} - \nabla + \left(\frac{B^2}{2\mu} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$(k = \hat{B} \cdot \nabla, \nabla_+ = \nabla - \hat{B}(B \cdot \nabla), \mu = \text{투자율})$

가 되는데, 여기서 첫째 항은 자기력선의 장력이고, 둘째 항은 자기장의 압력이다. 가속되는 CS중 ($J \times B$)의 반경방향 성분은 외부전극과 접촉되어 마찰을 일으키게 된다. ($J \times B$)의 축방향으로 전개되는 CS는 precursor 층과 플라스마층, 자기력층으로 구성되어 있다. precursor 층은 온도가 높고 압축된 중성기체로 구성되어 있으며, 점진적으로 여기 되고, 이온화되어 플라스마층에 공급된다.

세번째는 축방향으로 나아가는 CS가 전극의 끝부분에서 다시 내부전극 중심을 향하는 반경방향 운동을 하게 되며, 이 때 전극 끝부분에서 CS가 핀치를 일으키면서 $m=0$ mode instability 가 일어나게 된다. 플라스마가 핀치되는 과정에서 강렬한 광방사현상이 발생하게 된다.

네번째는 포커스가 붕괴되는 단계로서 $m=0$ instability가 붕괴하면서 형성된 전자와 이온 입자 빔은 전기적 성질에 따라 서로 반대방향으로 진행하게 된다. 전자 빔은 내부전극과 전자빔 사이에 형성된 강한 전기장에 의해 가속되어 내부전극에 충돌하면서 경 X-선 방사(hard X-ray radiation)까지 일으킨다.

2. Snowplow Model

플라스마포커스 장치에서 절연과피 단계에서 생겨나는 CS의 축방향 운동은 Kwek 등에 의해 제안된 snowplow model 로 설명이 된다^[8]. 이것은 CS가 축이 열린 방향으로 전개되어 가면서 플라스마 포커스공간의 이온화된 입자들을 마치 눈을 치는 닢가래(snowplow)가 눈을 쓸어가는 모양으로 묘사한 모델로서 쓸어가는 모든 입자가 계속 축적되는 non-steady snowplow와 쓸어가는 중 일부의 입자가 닢가래 양쪽으로 빠져나가서 언제나 일정한 입자만 끌려가는 steady snowplow로 나눌 수 있다. 본 실험에 사용된 플라스마포커스 장치는 외부전극구조가 새장형으로 구성되어 있어서 steady snowplow model로 CS의 운동을 묘사하는 것이 타당하다.

Steady snowplow model로 CS의 운동을 계산한 이론은 여러 가지가 있는데 그 중에서 analytic flow model과 수칙해석을 이용하여 Butler등이 계산한 결과는 다음 식과 같다^[9].

$$v = \frac{B}{(2\mu_0 \rho)^{1/2}} \quad (2)$$

$(B = \mu_0 I / 2\pi r)$

(2)식에서 v 는 CS의 속력이며, B 는 자기장, μ_0 는 투자율, ρ 는 기체 밀도, I 는 방전전류, r 은 전극의 반경이다.

또 회로방정식과 CS의 운동방정식을 이용하여, Dietz가 계산한 결과는 다음과 같다^[10].

$$v = 1.784 \times 10^{-4} V \left(\frac{C \log(r_d/r_i)}{L(r_o^2 - r_i^2)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

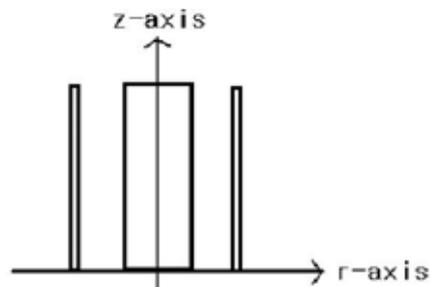


Fig. 1. Coordinates for the analysis of plasma current sheath by snowplow model.

(3)식에서 V는 방전전압이며, C는 전기용량, ro와 ri는 외부 및 내부전극의 반경, L은 인덕턴스이다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 축방향을 z 방향함수로 하고, 반경방향을 r방향함수로 하여 CS의 운동방정식만으로, snowplow model 을 계산하였다. 단, CS는 r 방향과 평행하게 전개되며, 전기회로의 영향을 받지 않는다고 가정하였다. Snowplow model에 의한 때 CS는 JxB 힘으로 전개되는데, 뉴우톤의 운동법칙과 결합하면

$$-\frac{d}{dt}(\rho \frac{dz}{dt}) = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 J 는 전류밀도이며, B 는 자기장이다.

질량 M = ρπ(ro²-ri²)Z(t), 자기장 B= μoI(t)/2πr 이고, 전류 I(t)를 I(t)=Io sin ωt로 두면,

$$zdz = A \int_0^{t_2} \int_0^{t_1} \sin^2 \omega t_1 dt_1 dt_2 \quad (5)$$

이 된다. 여기서 A = μoIo ln(ro/ri)/4π2 ρ(ro²-ri²)이다.

Z에 대해 구하면,

$$z = A^{1/2} \left(-\frac{t^2}{2} + \frac{\cos 2\omega t}{4\omega^2} - \frac{1}{4\omega^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

이 되는데, v=dZ/dt를 구하기 위해 시간에 대해 미분하고, 본 실험의 방전전류 곡선에서 ωt=π/2일 때 Io=Imax가 되는 경계조건을 이용하면,

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\pi}{4(\pi^2-2)^{1/2}} \left[-\frac{\mu_0 \ln(r_o/r_i)}{(r_o^2-r_i^2)^{1/2}} \right]^{1/2} V_0 \left[\frac{C}{L} \right]^{1/2} \rho^{-1/2} \quad (7)$$

가 되어 방전전압 Vo, 전기용량 C, 인덕턴스 L, 밀도 ρ를 이용하여 CS의 속력을 구할 수 있다.

III. 실험 방법 및 결과

플라즈마 포커스 장치의 두전극 사이에 축방향으로 9.8cm의 거리를 두고 로코프스키코일을 그림 2

와 같이 설치하여 축방향의 CS 속력을 측정하였다.

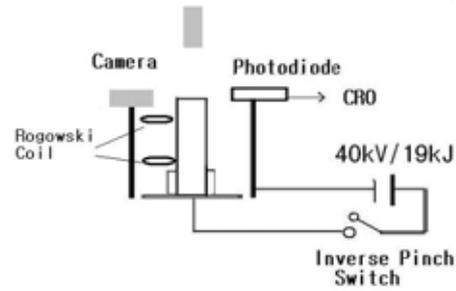


Fig. 2. Rogowski coil for the measurement of current sheath speed and Plasma Focus Device.

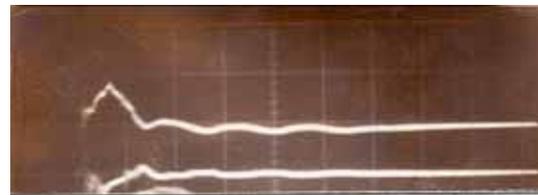


Fig. 3. Rogowski Coil signal for current sheath speed measurement. The upper signal is that of the below coil and the below signal is that of the upper coil in the device. The time scale is 5μs/div, the voltage is 5V/div.

Fig. 3은 5torr Ar이며, 15kV의 방전전압에서 로코프스키코일로부터 측정된 신호의 오실로스코프 사진인데, 윗부분 신호가 전극아래쪽에 설치된 로코프스키코일의 신호이고, 아래부분 신호는 전극 윗쪽에 설치한 로코프스키코일 신호이다. 위의 신호는 약 3μs 후에, 그리고 아래신호는 6.5μs 후에 각각 첫 번째 peak 치를 보이는데, 두 peak 사이의 시간이 3.5μs이므로 두 로코프스키코일 사이의 길이를 감안하면, CS의 속력은 2.8cm/μs가 된다. 방전전압을 15 kV로 하고, H₂, He, Ar 기체를 사용하여 0.1~ 3torr의 기압범위에서 CS의 속력을 측정된 결과가 Fig. 4의 (a),(b),(c)에 있다. 그림 4의 (a)는 H₂ 기체를 사용했을 때로서 그림 속에 표시된 직선은 앞서 이론에서 각 연구자들이 제시하였던 snowplow model에 의한 이론값이다. 측정값은 error bar와 함께 그림 속에 표시하였다. 그림(b)는 He 기체인 경우로 측정치가 (3)식과 (8)식 계산값 사이에서 잘 일

치함을 볼 수 있다. 그림 (c)는 Ar 기체의 경우인데, 기압이 증가함에 따라 (2)식 계산값에서 벗어남을 볼 수 있다. 기압이 증가 할수록 계산된 값보다 속력의 감소가 느린 것으로 보인다.

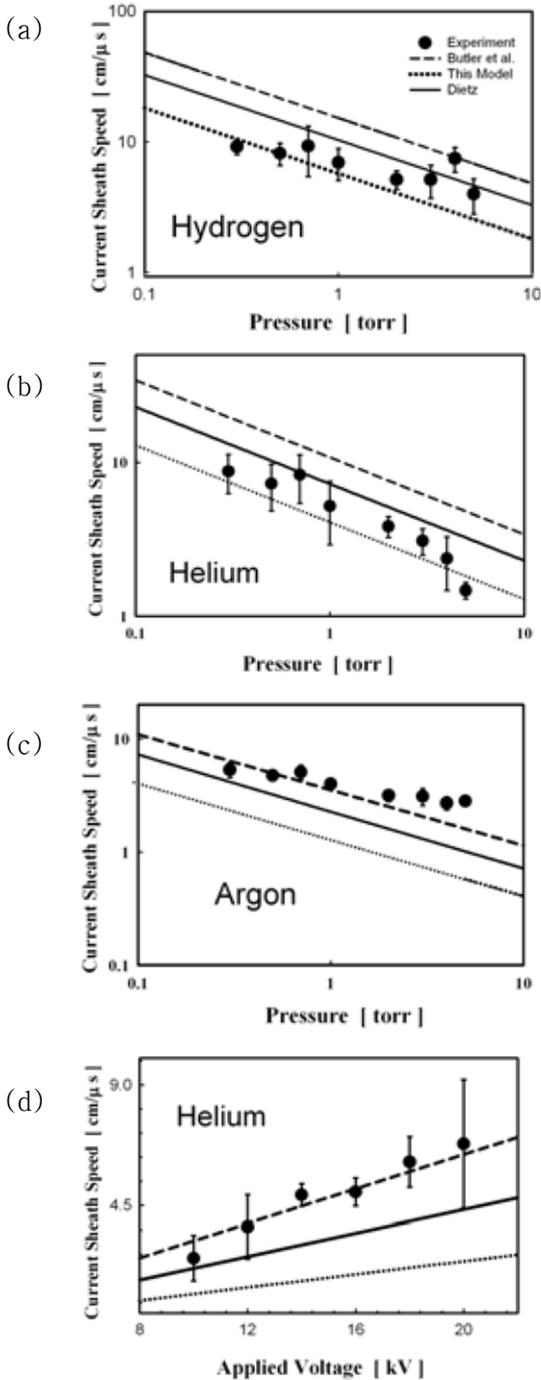


Fig. 4. Axial current sheath speed theory by snowplow model and experiments along (a)H₂, (b)He, (c)Ar pressure. (d) is along discharging voltage at 1 torr He.

이것은 다른 실험에서 관찰된 CS의 운동 사진에 의하면 속력이 느려지는 것보다 질량이 높은 기체일 수록 CS의 운동 시 내부 전극 쪽의 CS가 먼저 움직이고 외부전극 쪽의 CS가 나중에 운동을 시작함으로써 나타나는 CS의 기울기가 커져서 나타나는 현상인데, 이 같은 현상은 다른 유사한 실험에서도 관찰이 되고 있다^[11]. 이는 곧 내부 전극 쪽의 CS와 외부 전극 쪽의 CS의 속력에 큰 차이가 생겨서, 즉, 두 전극 사이에 걸쳐 있는 CS의 기울기가 커져서 기압이 증가하여도 로코프스키코일을 통과하는 CS 시간차이가 변화가 크게 없다는 증거가 된다. 이로서 그림에서 관찰되는 것처럼 기압이 증가하여도 이론치보다 CS의 속도 감소가 적다. 질량이 높은 기체에서도 일치하는 모델을 만들기 위하여 다음의 두가지 방법을 시도할 수 있다.

첫째, snowplow 모델 계산에서 처음에 가정하였던 current sheath가 r 방향과 평행하게 이동한다는 가정을 수정해야 될 것이다. 즉, 차이가 나는 이유는 CS의 기울기 때문이므로 이것을 수정하기 위하여 (4)식에서 왼쪽의 운동식 항에 cosine 함수를 첨가하여 계산할 수 있다. cosine 함수의 각도 θ 는 r 방향과 외부전극사이의 각이다. 둘째, CS가 r 방향과 평행한 운동은 steady 운동으로 전개될 수 있지만, 무거운 기체의 경우 기울기가 커져서 r 방향과 평행한 운동으로 보기가 어렵다. 이것은 기울기가 크짐에 의해 내부전극쪽의 CS가 내부전극 끝부분까지 도달할 동안에 외부 전극 쪽의 CS 는 진행이 얼마 되지 않아서 일부의 CS 만 외부로 나가게 된다. 결국 전체 CS의 운동은 외부전극 안에 갇혀있는 형태로 전개되며, 이와 같은 CS 의 운동은 steady 운동보다 non-steady 운동으로 취급하는 것이 좀 더 정확할 것이다. Fig. 4의 (d)는 1 torr He 기체일 때, 방전 전압을 9~ 0kV 까지 증가시킨 것으로 (2)식과 일치하고 있다.

IV. 결 론

펄스형 방전플라즈마 장치인 플라즈마 포커스 장치에서 current sheath의 속도를 로코프스키 코일

을 이용하여 측정하고, 이를 snowplow 모델에 의한 계산과 비교하였다. current sheath는 106cm/s의 속도를 유지하였다. 가벼운 기체에서는 snowplow 모델에 의한 계산과 일치하였으나, 무거운 기체에서는 모델값에서 벗어남이 관찰되었다. 이것은 무거운 기체일수록 Current sheath의 속력이 내부 전극 쪽은 빠르고, 외부 전극 쪽은 느려서 current sheath가 기울어진 형태로 가속된 결과로 추정된다.

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, pp.187(1971).
- [3] H. Kelly and G. Giudice, "Kinematics and Structure of a Plasma -Focus Current Sheath During its Radial Implosion Stage" IEEE Plasma Science, 18:646-651 (1990).
- [4] P.J. Hart. "Modified Snowplow Model for Coaxial Plasma Accelerators". J. of Applied Physics, 35(12): 3425-3431(1964).
- [5] J. H. Lee and M. D. Williams, "UV Emission from the Metal Plasma in a Plasma-Focus Apparatus" Bull. Am. Phys. Soc., 22:1211(1977).
- [6] 최운상, 정수자, 김용훈, 장준규, 정정복, 신장철, "펄스형 방전플라스마에서 발생하는 가시광선의 분광(II)", 한국안광학회지, 5(2):163-165 (2000).
- [7] 최운상, 문병연, 곽호원, "펄스형 방전플라스마에서 발생하는 X선 측정", 한국안광학회지, 11(4):311-315(2006).
- [8] K.H.Kwek et al, "Current Sheath Strictures of the Plasma Focus in the Run-Down Phase" 18(5):826-830 (1990).
- [9] T. D. Bulter et al, "Coaxial Snowplow Discharge" Phys. of Fluids, 12:1904(1969).
- [10] D. Dietz, "Coaxial plasma accelerator in the snowplow mode : Analytical solution in the weak coupling limit". J. Appl. Phys., 62:2669(1987).
- [11] J. A. Victoreen, "The Calculation of X-Ray Mass Absorption Coefficients" J. App. Phys., 20:1141-1149(1949).

Speed of Current Sheath in Pulsed Discharge Plasma Device

Woon Sang Choi, Ho Seong Choi

Department of Ophthalmic Optics, Pusan Women's College

(Received December 1, 2006; Revised manuscript received January 15, 2007)

The axial speed of plasma current sheath was measured with Rogowski coils and compared with the theory of snowplow model. Current sheath speed is measured with 10^6 cm/s. The speed of light gas, H_2 and He were similar to the theory of model, but the heavy gas, Ar was not similar to the theory. The disagreement of the heavy gas was guessed as a results of the instability of the current sheath.

key words: plasma current sheath, Rogowski coil , snowplow model