

계단파신호전압을 리용한 탐침진단에서 플라즈마전자온도결정

김철민, 김문옥

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《세포공학, 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 원자에너지, 태양에너지를 비롯한 새로운 에너지를 개발하며 레이자와 플라즈마를 깊이 연구하여 인민경제에 널리 리용하도록 하는데 힘을 넣어야 하겠습니다.》(《김일성전집》 제72권 292페이지)

계단파신호전압을 리용한 탐침진단방법은 최근에 이온권플라즈마를 비롯한 비평형플라즈마의 특성량진단에 널리 리용되고있다.[2-5]

론문에서는 탐침에 계단파신호전압을 걸어줄 때 측정한 전압-전류특성곡선으로부터 플라즈마전자온도결정의 정확도를 높이기 위한 진단방법에 대하여 고찰하였다.

1. 탐침전압-전류특성곡선

실험은 극간거리가 0.08m이고 반경이 0.015m인 Mo원통형전극이 설치된 길이가 0.3m, 반경이 0.03m인 기체방전관에서 진행하였다. 길이가 0.003m, 반경이 $2 \cdot 10^{-4}$ m 인 Mo원기둥탐침을 방전관의 중간부에 삽입하고 배기하여 10^{-2} Pa의 압력에서 비평형플라즈마를 형성시켰다.

계단파신호전압에 의한 탐침진단회로[2]를 리용하여 측정된 탐침전압-전류특성곡선은 그림 1과 같다.

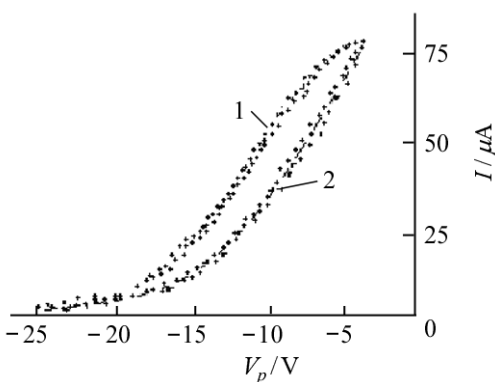


그림 1. 계단파신호전압을 리용하여 측정된 탐침전압-전류특성곡선

그림 1에서 측정점들이 분포된 곡선 1과 2는 각각 탐침전압을 증가시킬 때와 감소시킬 때 측정된 특성곡선들이다. 그림으로부터 탐침에 걸리는 전압이 점차적으로 증가할 때와 감소할 때 얻어지는 전압-전류특성곡선은 리력특성을 가진다는 것을 알수 있다. 이 두 곡선을 평균하여 플라즈마특성량 결정에 리용하였다.

탐침에 전압을 걸어줄 때 플라즈마속에 삽입된 탐침으로 흐르는 전자전류는

$$I_e(V_p) = \frac{eN_e S_p}{4} \left(\frac{8kT_e}{\pi m} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{e(V_s - V_p)}{kT_e} \right] \quad (1)$$

이므로 전자온도 T_e 는

$$T_e = \frac{e/k}{d \ln I_e(V_p) / dV_p} \quad (2)$$

에 의하여 결정할수 있다. 여기서 S_p , V_s 는 각각 전자포집면적과 공간전위이다.

2. 탐침특성곡선에 의한 전자온도결정방법

식 (2)로부터 전자온도 T_e 는 반로그자리표로 표시한 $V_p - \ln I_e$ 특성곡선으로부터 구할 수 있다.(그림 2)

그림 2에서 보는바와 같이 T_e 의 결정에서는 $V_f < V_p < V_s$ 인 영역에서 접선을 긋는 문제가 무엇보다 중요하다. 그러므로 $V_f < V_p < V_s$ 인 영역에서 자료점들을 직선으로 근사화하고 그 경사도로부터 전자온도 T_e 를 결정하였다.

우선 직선으로 근사화할수 있는 구간을 정확히 설정하기 위하여 다음과 같은 함수 H 를 리용하였다.

$$H = \frac{\delta_b}{b} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

여기서 b 는 일정한 구간을 선택하여 $y = a + bx$ 의 형태로 근사화하였을 때 직선의 경사도이며 δ_b 는 이 경사도의 절대오차, n 은 선택된 구간의 자료점들의 개수이다. 식 (3)에서 보는바와 같이 δ_b/b 는 근사화한 직선의 경사도의 상대오차값으로서 이 값이 작을수록, 선택된 자료점들의 개수 n 이 클수록 함수 H 의 값은 최소로 다가간다.

이로부터 함수 H 의 값이 최소로 되는 구간을 선택하고 이 구간을 최소두제곱법을 리용하여 $y = a + bx$ 의 형태로 근사화할수 있다. 여기서 y 는 전자전류의 자연로그값 $\ln I_e$, x 는 탐침전압 V_p 이다.

측정되는 자료 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 으로부터 최소두제곱법을 리용하면 a, b 는 다음의 식에 의하여 결정된다.

$$a = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{n \sum x_i \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5)$$

이때 결수들의 오차는 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_a^2 = \frac{\sum x_i^2 \sum (y_i - a - bx_i)^2}{(n-2) \left[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right]} \quad (6)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{n \sum (y_i - a - bx_i)^2}{(n-2) \left[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right]} \quad (7)$$

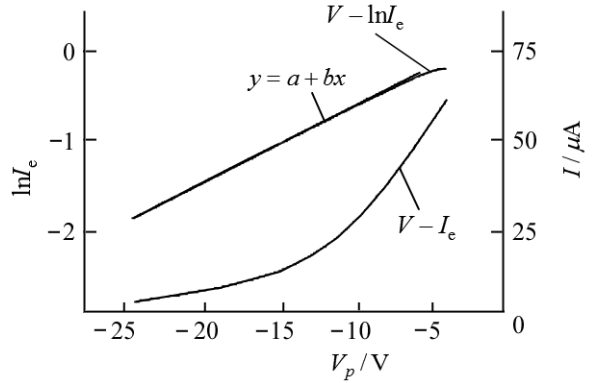


그림 2. 반로그척도에서의 탐침전압-전류특성곡선

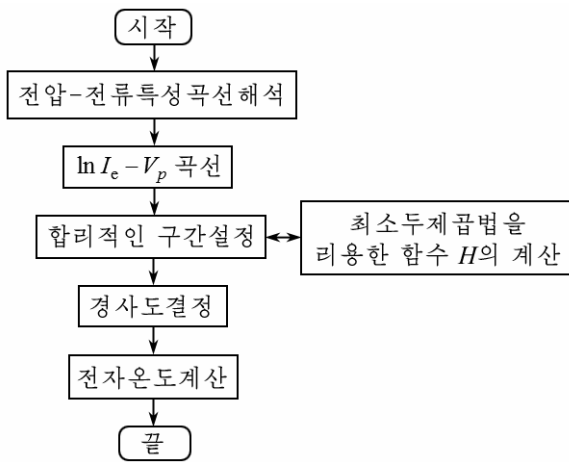


그림 3. 전자온도 T_e 계산알고리즘

즉 식 (2)에서 $d \ln I_e / dV_p \approx b$ 로서 함수 H 의 값이 최소값을 가질 때의 구간으로부터 전자온도 T_e 를 결정한다.

우와 같은 방법으로 전자온도를 결정하기 위한 계산알고리즘은 그림 3과 같다.

우리의 실험조건에서 함수 H 의 값이 최소로 되는 포텐셜영역은 $-10 \sim -5V$ 이다. 이 구간에서 반로그곡선의 선형성이 좋은 근사를 주었다.

실험으로부터 결정한 전자온도는 $T_e = (11\,560 \pm 220)K$ 으로서 같은 조건에서의 선행연구결과[1]와 오차범위에서 일치하였다.

맺는 말

계단파신호전압을 이용한 탐침측정체계에 의하여 얻은 탐침전압-전류특성곡선으로부터 전자온도결정의 정확도를 높이기 위한 방법을 연구하고 저진공플라즈마에서 전자온도를 결정하였다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 56, 2, 92, 주제99(2010).
- [2] 김철민 등; 원자력, 1, 39, 주제106(2017).
- [3] B. Holback et al.; Annales Geophysics, 19, 601, 2001.
- [4] B. L. Robert et al.; Review of Scientific Instruments, 81, 073503, 2010.
- [5] H. Amemiya et al.; Journal of Plasma and Fusion Research, 81, 7, 517, 2005.

주제107(2018)년 6월 5일 원고접수

Decision of Plasma Electron Temperature by Using a Step Signal Voltage in Probe Diagnostics

Kim Chol Min, Kim Mun Ok

In this paper we studied on the way which could raise the accuracy of electron temperature decision from probe voltage-current characteristic curve.

We got this curve by probe measurement system using a step signal voltage.

Key words: plasma diagnostics, probe diagnostics, electron temperature