

교류 저전계 인가시 약이온화된 플라즈마 전자에너지 변화의 수치해석

Numerical Analysis of Electron Energy Variation in Weakly Ionized Plasma Under Low Alternating Electric Fields

池 哲 根* · 張 禹 鎭** · 朴 旺 烈*** · 李 鎭 雨§
(Chol-Kon Chee · Woo-Jin Jang · Wang-Ryeol Park · Chin-Woo Yi)

요 약

교류 저전계 인가시 약이온화된 플라즈마의 전자에너지 변화를 구하는 식을 전자와 중성원자 간의 탄성충돌만을 고려하여 유도하였다. 이 식을 4차 Runge-Kutta method를 사용하여, 아르곤기체에 주파수 100, 1k, 10k, 100k, 1[MHz]에 적용하였는바, 주파수가 높아질수록 직류전원 인가의 경우로 수렴함을 알 수 있었다.

Abstract- We have derived the equation which involves the variation of electron energy with time in a lowly ionized plasma when a low alternating electric field is applied. We consider only elastic collisions between electrons and neutral atoms. This equation is solved using the 4th-order Runge-Kutta method, and applied to argon gas discharge which is driven by source frequency of 100, 1K, 10K, 100K, and 1M [Hz]. The results show that the variation of electron energy becomes flat with higher frequencies.

1. 서 론

교류저전계 인가시 플라즈마 내의 전자 평균에너지

*正會員: 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正會員: 서울産業大 電氣工學科 助教授 · 工博

***正會員: 서울대 大学院 電氣工學科 博士過程

§正會員: 서울대 工大 電氣工學科 講師 · 工博

接受日字: 1989年 8月31日

1次修正: 1990年 3月15日

2次修正: 1990年 4月23日

지의 시간에 대한 변화는 laser pumping을 하기위한 여기비율과 절연파괴전압을 계산하는 경우 필요하다. 그러나 여러가지 변수를 고려하는 경우 식이 대단히 복잡하여지게 되므로 여러가지 변수 중 우선한 것만을 고려하여 간단한 방정식으로 만들어 계산하는 것이 바람직하다. 이 부분의 연구로는 W.L. Harries의 연구가 있으나, 그의 연구는 해석적으로 해를 구하기 때문에 여러가지 기체에 적용하는 경우 사용 데이터를 적당한 형태로 사전처리를 하여야 하는 단점을 갖고 있다. [1] 그러므

로 본 논문에서는 수치해석 방법을 사용하여 보다 일반적인 경우에 사용이 가능한 계산방법을 제시하고, 이 방법을 사용하여 기체방전에 널리 사용되는 아르곤기체에 교류 저전계를 인가한 경우 주파수에 대한 전자에너지의 시간에 따른 변화에 계산한 결과를 보이려고 한다.

2. 본 론

약이온화된 플라즈마(전류밀도 $\sim 10^2 [A/m^2]$)에서 중요한 역학적 작용은 전자와 중성원자 간의 충돌이다. 전자의 충돌주파수 ν_{col} 은 전자의 속도에 관한 함수인 충돌단면적으로부터 구하여진다.

전자에너지 U_e 의 시간 dt 동안의 변화는 축에 평행한 각주파수 ω 의 전기장 E 로부터 얻는 에너지와 중성원자와의 탄성충돌에 의하여 잃는 에너지의 차이로 주어진다 가정한다. 비탄성충돌은 무시하였으므로 본 논문의 분석은 방전개시가 일어날 정도의 낮은 전기장의 경우에서만 정확하게 된다. 고전계의 경우에는 비탄성충돌에 의한 에너지 손실이 상당히 크게 계산된다. 전자가 중성원자와 충돌할때 잃는 에너지의 비율은 $\chi \approx 2m/M$ (m, M 은 각각 전자, 중성원자의 질량)으로 주어진다. 이상의 사실을 에너지의 단위로 eV 를 사용하여 식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$dU_e(\omega t) = E(\omega t) dx - \chi \nu_{col} (U_e(\omega t) - U_g) dt \quad (1)$$

단, U_g 는 중성원자의 평균에너지, 약이온화 플라즈마의 경우 $U_e(\omega t) \gg U_g$. 식(1)의 좌변은 시간 dt 동안의 전자에너지 변화, 우변의 첫 항은 전자가 거리 dx 를 이동하는 동안 전기장 E 로부터 얻는 에너지이며, 둘째 항은 전자가 거리 dx 를 이동하는 시간 dt 동안에 중성원자와의 탄성충돌에 의하여 잃는 에너지를 나타낸다. 식(1)을 ωt 로 미분하고, $dx/dt = \mu_e E(\omega t)$ (여기서 μ_e 는 전자의 이동도의 관계를 사용하면 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dU_e(\omega t)}{d(\omega t)} = \frac{\mu_e [E(\omega t)]^2}{\omega} - \frac{\chi \nu_{col} U_e(\omega t)}{\omega} \quad (2)$$

아르곤 기체의 경우 전자의 분포함수를 Maxwellian으로 가정하고 μ_e 와 ν_{col} 을 계산하면 식(3)(4)로 나타낼 수 있다. [2]

$$\mu_e = \frac{455}{p} \mu_e(\omega t)^{-1.55} [m^2 V^{0.65} s^{-1}] \quad (3)$$

$$\nu_{col} = 15 \times 10^8 p U_e(\omega t)^{1.55} [V^{-1.65} s^{-1}] \quad (4)$$

단, p 는 아르곤기체의 압력, 단위는 [torr].

아르곤기체 1 [torr], $E(\omega t) = 50 \sin(\omega t)$ [V],

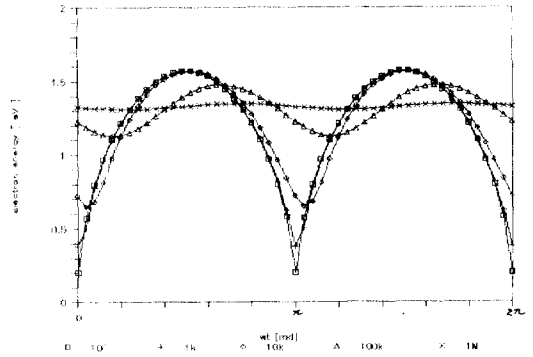


그림 1 아르곤기체 내 전자에너지의 전원주파수 1주기 중의 변화 (100, 1k, 10k, 100k, 1MHz)

Fig. 1 The Variation of electron energy of argon gas in 1 cycle (100, 1k, 10k, 100k, 1MHz)

전원주파수 100, 1k, 10k, 100k, 1[MHz]의 경우를 식(3)에 대입하여 4차 Runge-Kutte method를 사용하여 구한 전자에너지 한주기의 변화를 그림1에 도시하였다.

그림 1에서는 주파수가 증가할수록 주기 중 전자에너지의 최소치는 급격히 증가하며, 최고치는 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 전자에너지의 실효치는 인가 주파수 증가에 따라 증가하며, 고주파 영역 (5 [MHz] 이상)에서는 직류전압을 인가한 경우의 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 그리고 파형이 일정한 전압을 인가한 경우 전자에너지의 최대치가 나타나는 점이 주파수 증가에 따라 점차 후방으로 이동함을 볼 수 있다.

3. 결 론

교류 저전계 인가시 플라즈마 내의 전자에너지 변화를 전자에너지로 표현된 전자기동도와 충돌주파수를 사용하고, 수치해석 방법을 이용하여 간단하게 구할수 있는 방법을 제시하고, 아르곤기체에 적용한 예를 보였다.

본 논문의 결과에 의하면 일정 전압을 인가하여 방전에서 순간적으로 높은 전자에너지를 필요로 하는 경우는 저주파수를 사용하고, 실효치가 큰 전자에너지를 필요로 하는 경우에는 고주파수를 인가하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

본 논문에서 사용한 방법은 방전 내의 이온화비율과 절연파괴 전압등을 간단하게 계산하는 경

우에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

앞으로 전자와 중성원자 간의 비탄성충돌을 고려하고, 회로방정식과 연관된 경우에 사용할 수 있는 식의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] W.L. Harries, "Electron Energies in Weakly

Ionized Plasmas Under Alternating Electric Fields", Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 26, no. 3, pp. 585-587, 1984

[2] J Polman, JE van der Werf and PC Drop, "Nonlinear effects in the positive column of a strongly modulated mercury-rare gas discharge", J. Phys. D:Appl. Phys., vol. 5, pp. 266-279, 1972.
