

이온권에서 정전기탐침에 의한 플라스마결집의 특성

김문옥, 리승창, 오철수

이온권을 구성하고있는 플라스마의 특성을 깊이 파악하는것은 플라스마속을 비행하는 인공위성들의 손상을 줄이고 그 특성을 개선하는데서 선차적인 문제로 제기된다.

플라스마에서 전자온도가 증가하거나 전자밀도가 감소할 때 데바이길이가 증가하므로 이온권에서 정전기탐침을 리용할 때에는 반드시 결집의 영향을 고려하여야 한다.[2-4]

본문에서는 이온권에서 플라스마진단을 목적으로 제작한 정전기탐침에 의해 형성되는 플라스마결집의 특성을 고찰하였다.

1. 이온권에서 플라스마진단을 위한 정전기탐침

일반적으로 플라스마에서 탐침진단에는 2개의 근사 즉 궤도운동제한(orbital motion limited—OML)리론과 결집면적제한(sheath area limited—SAL)리론이 리용되고있다.[2]

보통의 이온권조건들에서는 탐침반경이 OML조건을 충분히 만족할수 있도록 작으므로 일반적으로 원기둥형탐침을 리용한다. 구형탐침에 대하여서는 같은 이온권조건에서도 OML조건을 만족하면서 같은 크기의 전류를 보장하기 어려우므로 원기둥형탐침에서와 같은 크기의 전류를 얻자면 탐침의 직경을 크게 해야 한다.

OML조건에서는 탐침반경이 전극주위에 생기는 결집두께에 비하여 작아야 하며 SAL 조건에서는 반경이 결집두께보다 더 커야 한다.

밀도가 큰 플라스마 즉 전자온도와 밀도가 각각 $T_e \approx 1\,000 \sim 3\,000\text{K}$, $N_e \approx 10^4 \sim 10^6\text{cm}^{-3}$ 인 경우에 결집두께는 약 0.01m 정도이며 이것은 SAL조건을 만족시키는 탐침을 만들수 있게 한다. 한편 이온층의 상층권영역과 플라스마층영역에서는 결집두께가 0.1m 로 더 커지므로 OML조건을 만족시키는 탐침이 요구된다.

보통 리용되고있는 정전기탐침은 데바이길이에 비해 너무 작아 SAL조건을 만족시킬수 없으므로 탐침의 크기는 OML조건에 기초하여 결정되어야 한다.

데바이길이는 편의된 탐침우에 있는 전하가 플라스마속에서 차폐되는 영역길이로서 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2}} \quad (1)$$

탐침반경과 데바이길이사이의 조건

$$\frac{r_p}{\lambda_D} < 1 \quad (2)$$

이 만족될 때 OML리론을 적용할수 있다.

막스웰분포를 이루는 플라스마에서 탐침으로 흐르는 열전류 I_{e0} 은 전자밀도 n_e 와 탐침의 결면적 S 에 관계된다.

$$I_{e0} = en_e S \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \quad (3)$$

이 전류는 탐침포텐셜과 공간포텐셜이 같을 때 즉 $V_s = V_p$ 일 때 탐침으로 흐르는 전류이다.

이온권의 플라스마층령역에서는 OML조건이 만족되며 탐침전류를 보장하자면 탐침면적이 식 (3)으로부터 전자온도가 3 000K이고 밀도가 10^4cm^{-3} 일 때 56.8cm^2 이여야 한다는 것을 알수 있다.

이로부터 직경이 10mm인 원기둥형탐침의 길이는 약 40mm이상, 구형탐침인 경우에 구의 반경은 20mm정도로 보장해야 한다는 결과를 얻었으며 그에 따라 정전기탐침을 설계하였다.[1]

원기둥형탐침의 직경은 3mm, 길이는 60mm이며 랑쪽 끝에 절연체를 사이에 두고 탐침보호체를 설치한다. 구형탐침의 직경은 10mm이고 절연체를 사이에 두고 탐침보호체를 설치한다. 보호체는 탐침과 같이 결면을 질화처리한 티탄으로 만드는데 직경은 원기둥형탐침과 같고 길이는 각각 40, 20mm이며 구형탐침에서도 보호체는 원기둥형탐침에서와 같이 만들며 직경은 3mm, 길이는 40mm로 한다. 이때 보호체에는 주탐침과 똑같은 편의전압을 걸어주어 정전기효과를 줄이도록 하였으며 위성결집의 영향으로부터 측정을 보다 정확히 진행할 목적으로 받침대를 설치하였다.

위성에 정전기적탐침의 설치위치를 설정하는데서 여러가지 조건을 고려하여야 한다.

우선 위성의 이동에 의하여 나타나는 섭동구역의 바깥쪽과 위성의 결집밖에 탐침을 설치하여야 한다. 위성본체는 이온권의 플라스마속을 비행할 때 음전기나 양전기로 대전되게 되며 이로부터 위성의 표면에 결집이 생기는데 이것은 탐침측정에 영향을 미친다.

또한 탐침에서 방출되는 빛전자들의 영향을 충분히 고려하여 이 영향이 최소로 되도록 설치하여야 한다.

2. 탐침포텐셜에 따르는 결집의 변화특성

빠쑹방정식으로부터 포텐셜 V 는

$$\Delta V = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0} \quad (4)$$

로 표시된다. 여기서 ρ_v 는 체적전하밀도이다.

원기둥형탐침과 구형탐침에 대하여 포텐셜이 대칭이라고 가정하면 옷식은

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{s}{r} \cdot \frac{dV}{dr} = -\frac{q}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \quad (5)$$

로 된다. 여기서 V 는 탐침이 놓인 점의 포텐셜, n_i , n_e 는 각각 이온밀도와 전자밀도, s 는 탐침종류에 관계되는 인수로서 원기둥형탐침에서 1, 구형탐침에서 2이다.

탐침에 포텐셜을 주사하기 전에 플라스마상태는 전체적으로 중성이며 이온밀도와 전자밀도, 중성립자밀도는 다 같다고 본다.

방정식을 풀기 위하여 변수들을 표준화된 무분량변수들로 치환하면 포텐셜은 $\tilde{V} = q_e V / (kT_e)$, 반경은 $\tilde{r} = r / \lambda_D$, 전자밀도와 이온밀도는 각각 $\tilde{n}_e = n_e / n_0$, $\tilde{n}_i = n_i / n_0$ 로 변환된다. 이 무분량들을 뽀쑹방정식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2 \tilde{V}}{d\tilde{r}^2} + \frac{s}{\tilde{r}} \cdot \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{r}} = -(\tilde{n}_i - \tilde{n}_e) \quad (6)$$

전압을 주사하기 전에 $n_i = 0$, $n_e = n_0$ 이라고 가정하면 웃식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2 \tilde{V}}{d\tilde{r}^2} + \frac{s}{\tilde{r}} \cdot \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{r}} = 1 \quad (7)$$

경계조건들은 다음과 같이 줄수 있다.

포텐셜 V 와 탐침포텐셜 V_p 사이에는

$$\tilde{V} = \tilde{V}_p \equiv q_e V_p / (kT_e), \quad \tilde{r} = \tilde{r}_p \equiv r_p / \lambda_D \quad (8)$$

가 만족되므로 전기마당이 이온결집경계에서 령이라고 하면 즉 $\tilde{r} = \tilde{r}_s \equiv r_s / \lambda_D$ 에서 $d\tilde{V}/d\tilde{r} = 0$ (r_s 는 결집반경이다.)일 때 원기둥 및 구형탐침에서 포텐셜은 다음과 같다.

$$\text{원기둥형탐침} \quad \tilde{V}(\tilde{r}) = -\tilde{V}_p + (\tilde{r}_s^2 / 2) \ln(\tilde{r} / \tilde{r}_p) + (\tilde{r}_p^2 - \tilde{r}^2) / 4 \quad (9)$$

$$\text{구형탐침} \quad \tilde{V}(\tilde{r}) = -\tilde{V}_p + (\tilde{r}_s^3 / 2)(1/\tilde{r}_p - 1/\tilde{r}) + (\tilde{r}_p^2 - \tilde{r}^2) / 6 \quad (10)$$

이제 식 (9)와 (10)에 $\tilde{r} = \tilde{r}_s$ 에서 $\tilde{V}(\tilde{r}) = 0$ 인 조건을 적용하고 \tilde{r}_s 를 끌어낸 다음 무분량들을 해당한 물리적량들로 다시 치환하면 다음과 같이 된다.

$$\text{원기둥형탐침} \quad r_s \approx \sqrt{3} \left(\frac{V_p \epsilon_0}{q_e n_0} \right)^{5/12} r_p^{1/6} \quad (\tilde{r}_s \gg \tilde{r}_p) \quad (11)$$

$$\text{구형탐침} \quad r_s \approx \left(\frac{3V_p \epsilon_0 r_p}{q_e n_0} \right)^{1/3} \quad (\tilde{r}_s \gg \tilde{r}_p) \quad (12)$$

설제한 정전기탐침의 크기는 원기둥형탐침에서 $r_p = 1\text{cm}$, 구형탐침에서 $r_p = 2\text{cm}$ 이고 탐침에 형성되는 포텐셜은 $V_p = -10 \sim 10\text{V}$ 범위이므로 탐침포텐셜에 따르는 결집크기변화를 계산하면 그림 1과 같다.

그림 1에서 실선들은 설계한 탐침에서의 계산곡선이며 점선들은 선행연구[3]에서의 결과이다.

한편 탐침으로부터의 거리에 따르는 포텐셜 분포는 식 (5)로부터

$$V(r) = a \left[\sqrt{r_s^2 - r^2} - r_s \ln \left(\frac{r_s + \sqrt{r_s^2 - r^2}}{r} \right) \right] \quad (13)$$

이다. 여기서 a 는 경계조건에 따르는 상수이며 결집의 크기는

$$r_s^2 = r_p^2 + \frac{\pi \lambda_d^2 \eta \sqrt{1 + 2\eta/3}}{\ln r_s - \ln r_p} \quad (\eta = e|V_p|/kT) \quad (14)$$

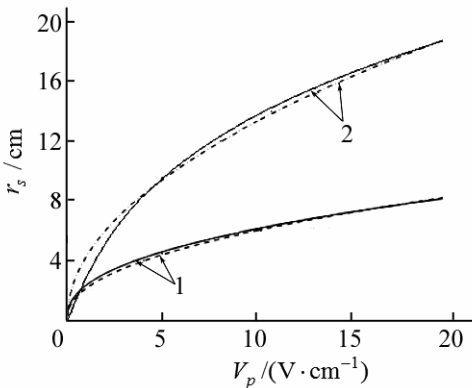


그림 1. 탐침포텐셜에 따르는 결집크기변화

1—구형탐침, 2—원기둥탐침,

실선—계산값, 점선—선행연구[3]값

로 쓸수 있다. 경계조건은 $V(r_s) = 0$, $V(r_p) = V_p$ 이다.

고도가 약 700km 인 이온권에서 전자밀도가 $\sim 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 라는것을 고려하여 제작한 구형 및 원기둥형탐침에서 계산한 탐침으로부터의 거리에 따르는 포텐셜분포는 그림 2와 같다.

계산값은 고도가 500~1 000km인 이온권에서 측정을 진행한 정전기탐침의 포텐셜분포특성과 잘 일치한다.[4] 이 탐침의 포텐셜분포특성을 그림 2에서 점선으로 표시하였다.

이로부터 제작한 정전기탐침을 이온권측정에 적용할수 있다는 결과를 얻었다.

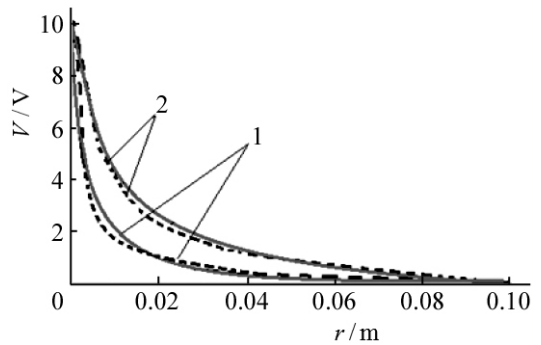


그림 2. 탐침으로부터의 거리에 따르는 포텐셜분포
1-구형탐침, 2-원기둥형탐침,
실선-계산값, 점선-선행연구[3]값

맺 는 말

이온권에서 플라스마진단을 목적으로 제작한 정전기탐침에 의해 형성되는 겔집의 크기 변화를 평가하고 겔집에서 탐침으로부터의 거리에 따르는 포텐셜분포특성을 결정하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김철민 등; 물리, 1, 39, 주체106(2017).
- [2] Charles M. Sweson; Langmuir Probe Measurements in the Ionosphere, Utah State University, 136~170, 2007.
- [3] Shilpi Chauhan et al.; International Journal of Scientific and Engineering Research, 4, 7, 1065, 2013.
- [4] P. Jelinek; Czechoslovak Journal of Physics, 56, 809, 2006.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

The Characteristics of Plasma Sheaths Surrounding Electrostatic Probe in Ionosphere

Kim Mun Ok, Ri Sung Chang and O Chol Su

We estimated the size of plasma sheaths surrounding the manufactured electrostatic probes for ionosphere plasma diagnostics on the basis of orbital motion limited(OML) theory.

And we considered the applicability of probe in the ionosphere measurement by determining the potential distribution according to the distance from probe.

Key words: plasma diagnostics, electrostatic probe, plasma sheath, ionosphere