

헬리콘 플라즈마 원을 이용한 우주 추진체의 특성

최근식, 우현중, 정규선, 이명재¹, 노태협², 정용호²

한양대학교 전기공학과, ¹한양대학교 물리학과, ²한국기초과학지원연구원

Characterization of the space propulsion system with a helicon plasma source

Geun-Sig Choi, Hyun-Jong Woo, Kyu-Sun Chung, Myoung-Jae Lee¹, Taihyeop Lho², and Yong Ho Jung²

Department of Electricity & Control Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

¹Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²Korea Basic Science Institute, Daejeon, 305-333, Korea

Abstract - VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket: JSC, NASA)의 개념을 바탕으로 하는 K2H (KBSI-KAIST-Hanyang University)라고 이름 붙여진 우주 추진체 모사장치 (Space Propulsion Simulator)를 개발하였다. 이 장치는 헬리콘 플라즈마 소스, 이온 가열부 (ICRH: Ion Cyclotron Resonance Heating), 자기노즐 부분으로 이루어져 있다. 헬리콘 플라즈마 소스는 m=+1 형태의 Right-helical 안테나를 사용하여 발생하였다. 본 연구에서는 K2H 장치의 기본적인 설계 개념 및 초기에 발생한 헬리콘 플라즈마의 물성을 RF 보상탐침을 이용하여 측정하였다. 그 결과 900 W, 13.56 MHz rf파워를 사용하여, 아르곤 7 mTorr하에서 전자밀도 = 10^{12} - 10^{13} cm⁻³, 전자온도 = 4-6 eV의 헬리콘 플라즈마를 안정적으로 발생시켰다.

도, 외부전극의 이점으로 인해 증착, 식각과 같은 반도체 산업체 및 여러 응용분야에서 주목받아 왔다.

헬리콘 파는 whistler wave ($\omega_{LH}, \omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}, \omega_{pe}$; ω_{LH} =lower hybrid frequency, ω_{ci} =ion cyclotron frequency, ω_{ce} =ion cyclotron frequency, ω_{pe} =plasma frequency)에 해당한다. 헬리콘 플라즈마는 압력, rf전력에 따라 capacitor 성분에 의해 발생하는 CCP (capacitively coupled plasma), 안테나 주변의 전자기장에 의해 발생하는 ICP (Inductively coupled plasma), 그리고 다음과 같은 분산식을 만족하며 자기장을 따라 전파하는 헬리콘 플라즈마로 변하면서 플라즈마 밀도의 급격한 증가가 발생된다. 헬리콘 파를 표현하는 분산식은 다음과 같다.[2]

$$\frac{n_0}{B_0} = \frac{k_{\parallel} \sqrt{k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2}}{\omega e \mu_0}$$

1. 서 론

우주선의 장거리 탐사를 위해 높은 추진력, 가벼운 연료의 무게를 갖는 추진체의 개발의 필요성이 크게 요구되고 있다. 이에 최근 핵분열, 레이저, 핵융합 에너지 등을 이용한 추진체의 연구가 진행 중에 있으며, 그 중 하나로 전기적 추진체가 항성 간 탐사를 위해 연구되고 있다.

그러나 대부분의 전기적 추진체는 플라즈마 발생을 위해 사용하는 전극이 플라즈마와 직접적으로 맞닿게 된다. 이에 전극의 부식이 발생하여, 추진체의 수명을 단축시키는 단점을 가지고 있다. 이에 대한 한 방안으로 VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket: JSC, NASA)에서는 rf를 이용한 헬리콘 플라즈마를 사용하였으며[1], 한쪽인 열린 미러 (mirror)모양의 자기장하에서 장거리 탐사에서 요구되는 높은 파워, 높은 이온 속도를 위해, 자기노즐 앞부분에서 ICRH를 해 주고 있다. 그리고 장치 노즐부분에서는 자기곡률에 따른 플라즈마 입자들의 분리현상을 이용한 자기노즐이 구성되어 있으며, 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 VASIMR의 기본 개념을 바탕으로 하는 K2H의 설계 변수 및 초기 발생된 플라즈마의 물성에 대한 기본 물성을 측정하였다.

2. 실험 장치

2.1 헬리콘 플라즈마 원

1970년 Boswell이 헬리콘 파로 플라즈마를 발생시킨 이후로, 다른 플라즈마 소스보다 적은 파워, 높은 전자밀

여기서 n_0 은 플라즈마 전자밀도, B_0 는 소스부분 자기장, k_{\parallel} 은 자기장에 평행한 파수, k_{\perp} 은 자기장에 수직하는 파수, e 은 전자의 전하량, μ_0 은 자기 투자율이다. 헬리콘 파가 전파하기 위해서는 분산식을 만족하는 플라즈마 전자밀도가 필요하며, 원통형 모양의 경계조건을 가질 때 위의 분산식을 만족하면서, azimuthal mode에 따라 m=+1인 right-hand polarization, m=-1인 left-hand polarization, 그리고 이 두 편향파가 합쳐진 평면파 등으로 전자기파가 정전기적 성분을 유도한다. 추진체 모사 장치의 경우 한쪽 방향으로 플라즈마의 진행이 필요하며, 높은 발생효율이 요구된다. m=-1의 경우는 안테나 주변에서만 자기장이 형성되지만, m=+1은 자기장을 따라 진행하게 되고, m=-1의 경우보다 플라즈마의 발생이 더 효율적이다. [3][4][5]

K2H 장치에 사용된 안테나는 두께 0.5mm, 폭 10mm의 구리판을 사용하여, 길이 18 cm의 m=+1을 만족시키는 right-helical 형태를 하고 있으며, 5%미만으로 impedance matching 하였다. 고정된 13.56 MHz, 최대 1kW rf파워를 사용하여 플라즈마를 발생하였다.

K2H의 구성도는 그림 1과 같다. 플라즈마 소스, ICRH, 자기노즐, 이렇게 세부분으로 구성되어 있다. 플라즈마 소스부분 2개, ICRH부분 3개, 자기노즐부분 2개, 총 7개의 전자석 코일이 위치해 있다. 자기장의 모양은 그림 2와 같다. 제작된 right-helical 안테나는 플라즈마 소스부분, 그림 2에서 보이는 파와 같이 4%의 균일함을 갖는 800G의 자기력을 갖는 전자석 코일 안의 직경 60 mm석영관 외부에 장착되어져 있다. 물리적 변수를 측정하기 위한 포트와 창은 ICRH, 자기노즐에 위치해 있다. 자기노즐 끝부분에 터보분자 펌프가 위치해 있

으며 기본압력 10^{-6} torr, 운전압력 10^{-3} torr에서 실험을 하였다.

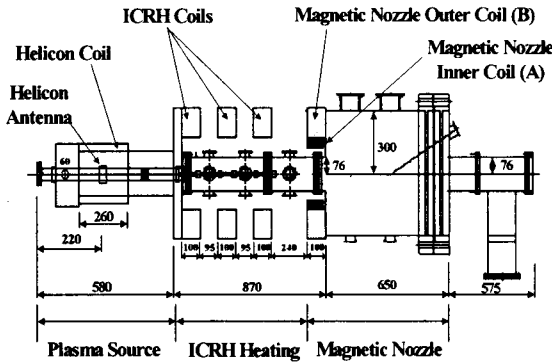


그림 1. K2H의 구성도 : 이장치는 세부부분으로 구성되어 있다. 플라즈마 소스, ICRH, 자기노즐, 초기 플라즈마 물리변수는 ICRH부분에서 전기탐침으로 측정하였다.

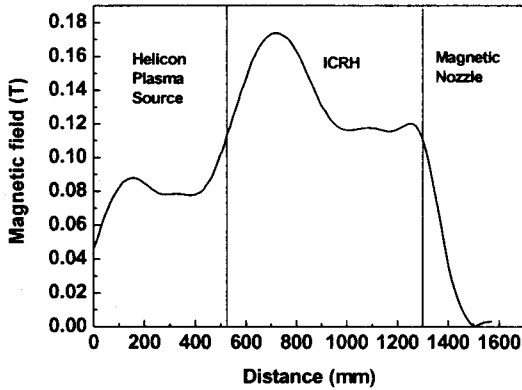


그림 2. K2H에 인가된 자기장의 분포.

2.2 전기 탐침

플라즈마 전위는 인가된 rf의 여러 차수에 의해 요동된다. 일반적인 Langmuir probe로 측정할 경우 평균을 취하게 되어 전자온도가 과대평가 되어 진다. 따라서, rf 요동을 제거하기 위하여 rf 보상탐침을 사용하였다. [6] rf 보상탐침은 13.56 MHz, 27.12MHz에서 공명하는 초크를 이용하여 rf 요동에 의한 효과를 줄였으며, 탐침 팁은 반경 0.5mm, 길이 2 mm의 원통형 물리브덴 팁을 사용하여 반경 1mm세라믹으로 고정하였다. 실제 탐침 팁 면적의 50배에 해당하는 reference 탐과 1 nF의 콘덴서 (capacitor)로 연결되어 있다. 그리고 1nF의 capacitor를 사용하여 Langmuir probe과 reference probe을 연결하였다. 그림 3은 제작된 rf 보상탐침에 사용된 공명회로의 결과로서 13.56 MHz와 27.12 MHz에서 공명이 이루어짐을 보여주고 있다.

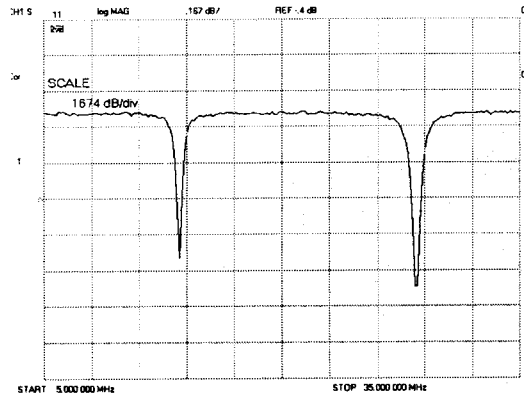


그림 3. Network Analyzer로 측정된 초크의 반사계수, 좌측으로부터 그래프는 13.56MHz, 27.12MHz의 반사계수를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 토의

헬리콘 플라즈마는 rf 인가전력에 따라 초기에 CCP 형태의 플라즈마 안에서 ICP 형태로 변화되고, 이어서 Wave 형태의 플라즈마로 모드로 변형되며, 각각의 모드 사이에서 급격한 플라즈마 밀도의 상승이 일어난다. 그림 4는 K2H 장치에서 발생된 플라즈마에서 rf 전력에 따른 이온 포화전류의 보여주고 있으며, 이는 ICP 모드에서 Helicon 모드로의 전환을 의미하고 있다. Helicon 플라즈마는 소스 부분의 자기장 800 G, 운전압력 7.8 mTorr에서 500 watt 이상의 rf 인가 전력 부분에서 안정적으로 발생하였다.

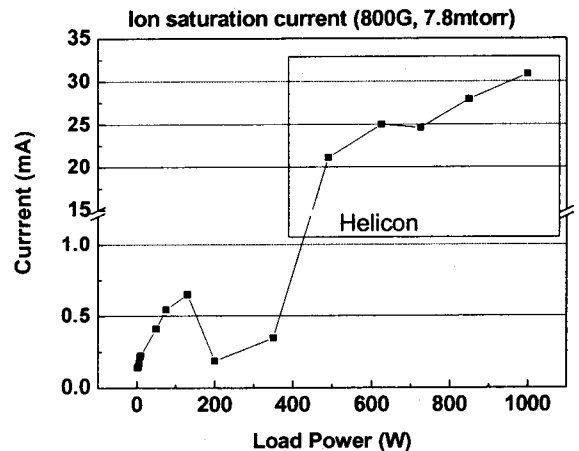


그림 4. rf 인가 전력에 따른 이온 포화 전류.

그림 5와 6은 각각 이온 가열 부분과 자기 노즐 부분에서 rf 보상탐침에 의해 측정된 전기탐침의 전류-전압 곡선을 보여주고 있다. 이온가열부 (ICRH)에서의 전자 온도와 밀도는 각각 3.26 eV, 1.27×10^{13} cc 이고, 자기노즐에 의해 분출된 플라즈마의 전자 온도와 밀도는 각각 3.19 eV, 1.5×10^{11} cc 이다. 전자는 기본적으로 iso-thermal 특성을 가지고 있으므로 이온 가열부와 자기 노즐에 의해 분출된 이후의 전자 온도가 거의 비슷함

을 보여주고 있다. 전자 밀도는 자기 노즐에 의해 분출되면서 자기장에 구속되어 있던 고밀도 플라즈마가 퍼지면서 밀도가 100배 정도 감소되는 것을 보여 주고 있다. 이는 향후 계획 중이 ICRH를 이용한 이온 가열 및 실제 우주 추진체에서 중요하게 생각되어지는 이온 에너지 및 이온 속도 (플라즈마 분출 속도)를 높이기 위한 기본적인 정보로 사용될 것이다.

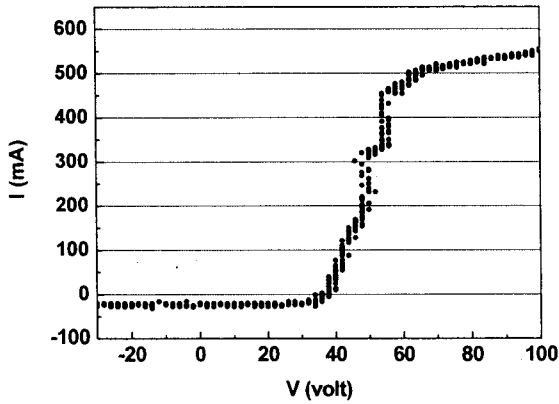


그림 5. ICRH 부분 플라즈마에 대한 rf 보상 탐침에 의해 측정된 탐침의 전류-전압 곡선 (전자온도 3.26 eV, 플라즈마 밀도 1.27×10^{13} cc)

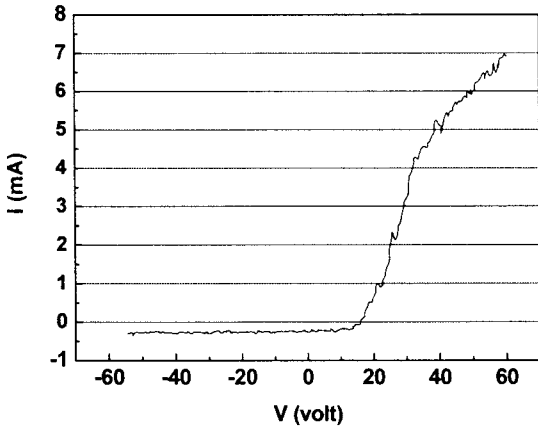


그림 6. 자기노즐에 의해 분출된 플라즈마에 대한 rf 보상 탐침에 의해 측정된 탐침의 전류-전압 곡선 (전자온도 3.19 eV, 플라즈마 밀도 1.5×10^{11} cc)

4. 결론 및 향후 연구계획

우주 추진체 모사장치인 K2H에서 초기 발생된 헬리콘 플라즈마의 전자온도와 전자 밀도를 rf 보상탐침을 이용하여 측정하였다. 전자 온도와 밀도는 이온 가열부와 자기노즐 부분에 의해 분출된 이후에 거의 비슷한 값을 가지게 되는데, 이는 전자의 iso-thermal 특성으로 설명될 수 있으며, 전자 밀도는 자기노즐 분출 이후 플라즈마가 자기장에 의한 구속에서 벗어나게 되므로 100배 정도 작아짐을 보여주고 있다.

실제 자기노즐을 이용한 플라즈마 추진체의 경우 이온 에너지와 이온 속도가 영향을 주므로 향후 실제 ICRH를 이용한 이온 가열 연구가 계획 중이며 이에 따른 이온 에너지 및 이온의 분출 속도는 전기탐침의 일종인 유속

탐침 (Mach Probe) 및 레이저 형광 유도법 (LIF: Laser Induced Fluorescence) 방법을 통하여 측정될 것이다.

[참고 문헌]

- [1] J. P. Squire, et. al. "Experimental research progress toward the VASIMR engine", 28th International Electric Propulsion Conference, Toulouse, France, 17-21, March 2003
- [2] F. F. Chen, " Plasma ionization by helicon waves", Plasma Phys. Control Fusion, 33, 339, 1991
- [3] M. Light, F. F. Chen, "Helicon wave excitation with helical antenna", Phys. Plasmas, 2, 1084, 1995
- [4] I. V. Kamenski, G. G. Borg, "An evaluation of different antenna designs for helicon wave excitation in a cylindrical plasma source", Phys. Plasmas, 3, 4396, 1996
- [5] D. G. Miljak, F. F. Chen "Helicon wave excitation with rotating antenna filed", Plasma Source Sci. Technol. 7, 61, 1998
- [6] I. D. Sudit, F. F. Chen, "RF compensated probes for high-density discharges", Plasma Source Sci. Technol. 3, 162, 1994