

## ECR Reactor 내의 Langmuir Probe 시뮬레이션

김 훈 \*, Robert K. Porteous†, Rod W. Boswell†  
강원대학교 전기공학과 \*, 호주국립대학교 플라즈마연구소†

### Simulation of a Langmuir Probe in an ECR Reactor

Hoon Kim \*, Robert K. Porteous†, Rod W. Boswell†  
Dept. of Elec. Eng., KNU \*, PRL, RSPHYSSE, ANU†

#### Abstract

In ECR and helicon reactors for plasma processing, a high density plasma is generated in a source region which is connected to a diffusion region where the processing takes place. Large density and potential gradients can develop at the orifice of the source which drive ion currents into the diffusion region. The average ion velocity may become the order of the sound velocity. Measurements of the ion saturation current to a Langmuir probe are used as a standard method of determining the plasma density in laboratory discharges. However, the analysis becomes difficult in a streaming plasma. We have used the HAMLET plasma simulator to simulate the ion flow to a large langmuir probe in an ECR plasma. The collection surface was aligned with the field upstream, normal to the field, and downstream. Ion trajectories through the electric and magnetic fields were calculated including ion-neutral collisions. We examines the ratio of ion current density to plasma density as a function of magnetic field and pressure.

#### 1. 서론

반도체 제작과정에서는 Etching, Deposition 등의 공정이 필수적으로 요구되며, 최근에는 저압플라즈마를 이용하여 이들 공정을 수행하는 장치들이 광범위하게 이용되고 있다. 이러한 장치는 microwave나 RF에 의해 source region에서 고밀도의 플라즈마를 발생시키고, 그 입자들이 diffusion region으로 확산되어 나가는 구조로 되어있다.<sup>1,2)</sup>

Langmuir probe는 플라즈마 내의 입자밀도 및 에너지분포를 측정하는 가장 표준적인 도구이다. probe의 전위에 따라 probe에 흐르는 전류 밀도가 변화하며, 이를 해석하여 입자밀도와 플

라즈마전위 및 에너지 분포(Energy Distribution Function, EDF)를 알아낼 수 있다. 그러나 플라즈마를 구성하는 입자들의 흐름이 있을 때나 자계를 인가하였을 때의 probe전위와 입자들의 관계는 이론적으로 해석하기가 매우 어렵다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 호주국립대의 플라즈마연구소에서 개발한 HAMLET 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 Helicon reactor의 diffusion 영역에 삽입된 대형의 Langmuir probe의 동작특성을 해석하였다.

#### 2. Helicon reactor와 Langmuir probe

본 연구에서 해석의 대상으로 삼은 Helicon reactor의 구조는 그림 1과 같다. 이는 두개의 원통으로 이루어져 있다. 위의 원통은 직경 12cm, 길이 20cm의 유리로 되어 있고 source region을 구성하며, 아래의 원통은 직경 30cm, 길이 20cm의 알루미늄 diffusion region으로서 접지되어 있다. 바닥에는 substrate가

Applied Power Input: 300W  
Argon Pressure: 0.1-1Pa

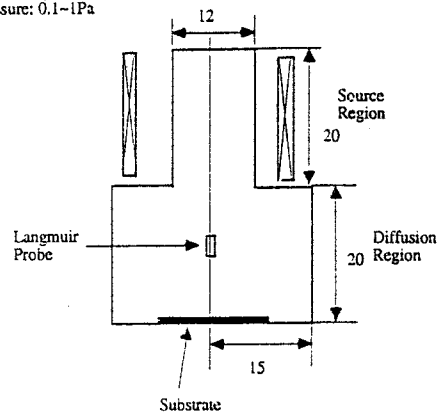


그림 1. Helicon reactor의 구조

놓여있고, 그 아래 직경 10cm의 포트를 통하여 배기되며, Argon gas의 압력을 0.1 - 1 Pa사이에서 조절할 수 있다. 300W, 13.56MHz의 RF power가 source region 밖의 helicon antenna에 의해 인가된다. source region과 diffusion region의 외부에는 solenoid coil이 감겨있어 약 200gauss 까지의 자계를 인가할 수 있으며, 이는 substrate에 도달하는 입자들의 비등방성 증가에 기여한다.

플라즈마의 특성을 측정하기 위하여 energy analyser chamber의 벽에 있는 포트를 통하여 삽입하고 있다. 이 probe는 직경 2cm, 길이 3cm의 구리원통으로서 3개의 그리드에 인가하는 전압을 조절함으로써 이온입자에 의한 전류만을 측정할 수 있으며, 이를 이용하여 이온밀도, 전위, 전자온도, 이온의 EDF (IEDF)를 측정할 수 있다. energy analyser의 기본 동작은 Langmuir probe와 같다. 고전적인 Langmuir probe 이론에 의하면 플라즈마 전위보다 낮은 전위의 probe에 흐르는 이온포화 전류는

$$I_B = \frac{1}{2} n_i e A \sqrt{k \frac{T_e}{M}}$$

$$= \frac{1}{2} n_i e A v_B$$

로 되어, 이온밀도  $n_i$ , 전자의 전하량  $e$ , probe를 둘러싼 sheath의 면적  $A$ , 이온의 Bohm velocity  $v_B$ 에 비례하게 된다.<sup>4)</sup> ( $k$ 는 볼츠만 상수,  $T_e$ 는 전자온도,  $M$ 은 이온의 무게이다.)

이 때 sheath의 면적은 probe의 크기가 sheath의 두께에 비하여 매우 크므로 probe의 겉면적과 거의 같다. 작은 크기의 자계를 인가하면 전자는 자속선을 따라 운동하므로 sheath에 진입하는 전자가 방향성을 갖게되고, 이는 sheath의 겉보기 면적의 저하를 가져와 전자포화 전류가 줄어들게 된다. 자계가 커지면 이온도 이와 같은 현상을 갖게 되므로 위의 식에 의존하여 플라즈마의 특성을 측정할 수 없게 된다. 현재 자계하에서의 포화 전류식은 유도되어 있으나 매우 복잡하고, 특히 입자의 흐름이 있을 때에는 수식이 유도되어있지 않다.<sup>3)</sup> 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여, probe의 위, 옆, 바닥의 각 면에 진입하는 이온에 의한 전류를 계산하고, 이 전류와 플라즈마 전위, 이온밀도의 관계를 구명하려는 것이다.

### 3. HAMLET

HAMLET은 축대칭의 reactor내에서 플라즈마 특성을 구명하기 위한 2차원 시뮬레이션 프로그램으로서 fluid model과 particle-in-cell(PIC) model을 결합한 형태이다.<sup>5)</sup> 즉 원자와 이온 등 무게가 무겁고 속도가 느린 입자들에 대해서는 적절한 가중치를 부여한 PIC model을 이용하여 플라즈마 전계와 인가된 자계하에서의 계산을 수행하고, 전자에 대해서는 fluid model을

적용하여 플라즈마 전위, 전자밀도, 전자온도를 계산한다.

PIC model에서는 원자와 이온의 각 입자들에 대해서 20,000개 정도 씩의 particle을 가정하고, 이들에 대해 각각 적절한 가중치와 함께 2차원 공간에서의 위치, 3방향의 속도를 준다. 이 particle들의 궤적을 전계와 자계 하에서 계산하게 되며, 이온과 중성원자 사이의 전하교환 충돌과 이온과 전자 사이의 Coulomb 충돌은 Monte-Carlo법에 의해 계산한다. fluid model에서는 전자에 대해 Maxwellian distribution을 가정하고, Poisson 방정식, 질량과 에너지 보존식을 reactor 내의 각 mesh에 대해 matrix로 구성한 뒤 Successive Over-Relaxation Method(SOR법)를 적용하여 풀게된다. 이 프로그램은 이미 실용화된 여러 유도결합형 reactor에 적용되어 좋은 결과를 얻은 바 있다.<sup>6)</sup>

### 4. 계산결과와 검토

표 1은 probe의 전위  $V_p$ 에 따라 probe의 각 면에 흐른 이온전류밀도를 계산한 결과이다. 이에 따르면, probe전위가 플라즈마 전위보다 충분히 낮은 경우, 이온의 포화전류는 probe전위에 거의 무관한 것을 알 수 있다.

표 1. probe전위에 따른 probe 각 면에의 이온전류밀도

	0 V	-50 V	-100 V
top	1175	1225	1168
side	958	976	959
bottom	774	789	812

reactor내의 기체압력, probe의 위치, diffusion region에 인가된 자속밀도 등을 변화시켜 가면서 HAMLET에 의해 얻어진

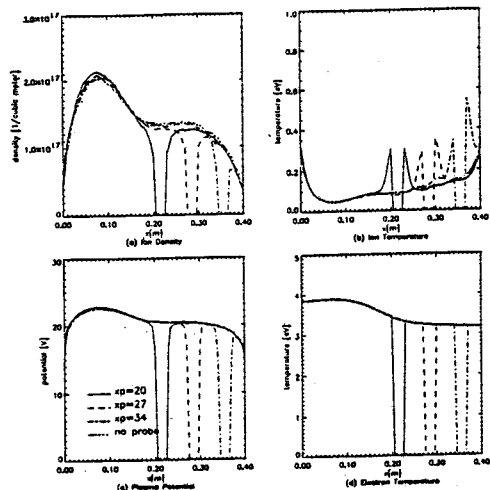


그림 2. Probe위치에 따른 플라즈마 특성변화 (아르곤압력 0.3Pa,  $x=0.2, 0.27, 0.34$  m)

결과를 그림 2 부터 그림 4에 보였다.

그림 2는 reactor의 축 상에서 probe의 위치를 변동시킬 때의 이온밀도, 이온온도, 플라즈마전위, 전자온도를 보인 것이다. probe가 diffusion region의 중심이나 바다 근처에 있을 때에는 probe가 없을 때와 비교하여 플라즈마의 특성변화가 거의 없으나, source region과 diffusion region이 만나는 위치에 있으면 ( $x=0.2m$ ,  $x$ 는 reactor의 위에서 부터 probe 윗면 까지의 거리) diffusion region에서의 이온밀도가 많이 감소하여 측정을 위한 probe의 삽입이 플라즈마 자체에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

그림 3은 아르곤압력 0.1, 0.3, 0.8 Pa일 때의 플라즈마 특성을 비교하여 그린 것이다. 압력이 증가함에 따라, 전자의 mobility는 감소하며 source부분에 인가된 rf power는 그 부분에만으로 점점 제한된다. 이로 인해 이온밀도는 source부분에서의 peak가 점점 높아지는 것을 볼 수 있다. 압력의 증가에 따라 원자의 밀도가 증가하며, 평균자유행정은 원자밀도에 반비례하므로 플라즈마를 내의 전자온도는 압력이 높아짐에 따라 점차 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 아르곤 압력 0.1Pa일 때에 diffusion region의 중심부에 11 - 165gauss의 축방향 자속을 인가한 경우의 플라즈마 특성변화를 보인 것이다. 자속의 증가에 따라 이온의 reactor내 존재시간이 늘어나며, 이온밀도는 증가한다. 자속이 100gauss이상으로 되면 대부분의 이온이 자속선을 따라 이동하여 더 이상 자속이 증가하여도 이온밀도의 증가는 미미하게 된다. 약간의 자속만을 인가해도 전자는 대부분 자속선을 따라 이동하며, 자속선에 수직방향의 확산은 거의 없어진다. 이에따라 probe 근처의 전자흐름은 source region과 분리되며, 자속밀도가 커질수록 이 경향은 심화되고 전자온도는 낮아진다.

## 5. 결론

본 연구에서는 PIC model과 fluid model을 결합한 HAMLET

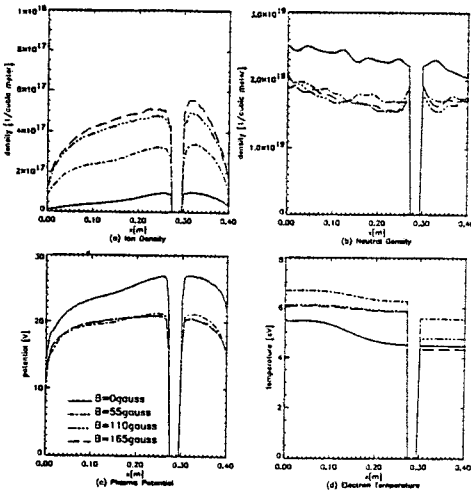


그림 3. 아르곤압력에 따른 플라즈마 특성변화

simulation program을 이용하여 helicon reactor 내의 probe 특성을 구명하였다. probe의 위치와 기체압력, 인가자속의 크기 등에 따라 플라즈마의 특성이 어떻게 변화하는 지를 알 수 있다. 현재 이 프로그램은 대부분의 reactor에서 좋은 결과를 내지만 비교적 좁은 source region을 갖는 reactor에서는 측정치와 매우 다른 결과를 보이고 있으며, 이는 reactor에서의 capacitive coupling의 영향에 의한 것으로 보인다. 이에 따라 저자들은 capacitive coupling이 거의 없는 reactor 구조에서의 측정치와 HAMLET의 계산 결과를 비교하기 위하여 실험을 수행하고 있는 중이다.

## 참고문헌

- 1) C. Charles, et. al., "Measurement and modeling of ion energy distribution functions in a low pressure argon plasma diffusing from a 13.56 MHz helicon source", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 10, No. 2, pp. 398-403, 1992
- 2) R.W. Boswell, R.K. Porteous, "Etching in a pulsed plasma", J. Appl. Phys., Vol. 62, No. 8, pp. 3123-3129, 1987
- 3) Chunshi Cui, "Experimental study and modelling of a low pressure RF generated magnetoplasma", Australian National University, Ph. D. Thesis, 1992
- 4) F.F. Chen, Plasma Physics and Controlled Fusion, Plenum Press, 1984, New York
- 5) R.K. Porteous, D.B. Graves, "Modeling and simulation of magnetically confined low-pressure plasmas in two dimensions", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 19, No. 2, pp. 204-213, 1991
- 6) A.R. Ellingboe, et. al., "Applications of a 2D simulation to industrial reactors", 46th Gaseous Electronics Conference (Montreal, Canada), p. 27, 1993

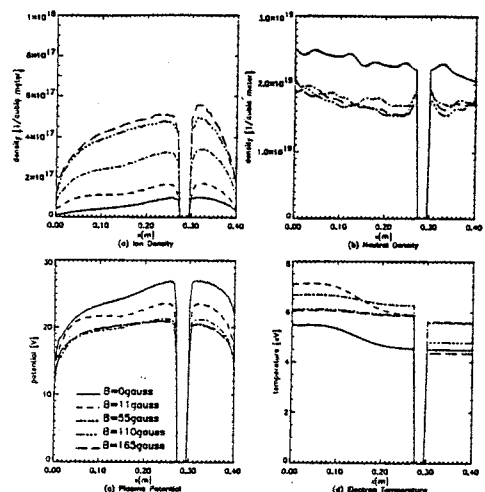


그림 4. 인가자속에 따른 플라즈마 특성변화