

## 자화된 플라즈마 내에서의 단분산 입자의 하전량 측정

한장식\* · 안강호\*\* · 김곤호\*\*\*

### Measurement of Monodisperse Particle Charging in Unmagnetized and Magnetized Plasmas

Jang-Sik Han\*, Kang-Ho Ahn\*\*, and Gon-Ho Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

Understanding of charging properties of a small particle is necessary to control the particle contamination and to improve productivity of the electronic device in the plasma aided semiconductor manufacturing processes. In this study, the effects of both magnetic field and particle size on the charging properties are experimentally investigated in collisional dusty plasmas. The experiments carried out in the system consisted of a monodisperse particle generation system, a DC magnetized plasma generation system and a charge measurement system. The plasma chamber is made of cross-shape Pyrex surrounded by magnetic bucket (composed of 12 permanent magnetic bar) to confine the plasma. DC magnetic field up to 250G are applied to the plasma zone by external magnetic coil. Previous work shows the charging effect clearly increase with increasing the size of the particle and plasma density, as it was expected.

**Key words** : Plasma(플라즈마), Magnetized plasma(자화된 플라즈마), DMA, Monodisperse particle(단분산입자), Charge(하전)

#### 1. 서 론

최근 반도체 공정에서 각광을 받고 있는 플라즈마 공정에는 스퍼터링(sputtering), PECVD와 같은 막증착 기술 그리고, 식각과 같은 막제거 기술 등이 포함된다. 플라즈마 공정이 각광을 받고 있는 이유는 플라즈마가 기체상의 현상으로 공정 중 발생하는 폐기물의 양이 습식 공정에 비해 대단히 적고 또한 최근 반도체 산업의 추세가 건식 공정으로 가고있기 때문이다. 그러나 플라즈마는 공정 중 많은 오염입자를 발생시켜 반도체 나 증착막 등의 수율을 저하시킨다. 이러한 오염입자들은 기체상의 핵생성(nucleation), 중합(polymerization), 또는 전극이나 플라즈마 용기 벽의 스퍼터링 등에 의해 발생하며, 그 크기의 전형적인 범위는 수십 nm에서 수백  $\mu\text{m}$ 이다[1-2]. 따라서 이러한 입자들을 플라즈마 내에서 효과적으로 제거하기 위해서는 플라즈마 내에

서의 입자의 하전 특성 및 거동을 이해하는 것이 필수적이다. 현재 이에 대한 이론적 및 수치적 연구는[3-4] 상당히 진전되어 있으나, 실험적 연구 결과는[5-6] 대단히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 일반적으로 이용되고 있는 RF 플라즈마가 아닌 구조가 단순한 DC 글로우 플라즈마를 이용하여 실험을 수행하였으며, 원형의 평행한 평판 전극에 음전압을 인가하여 플라즈마를 발생시켰다. 플라즈마 용기의 재질은 강화유리인 Pyrex이며, 그 형상은 원통형이다. 입자는 NaCl과 알루미나(Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 재료로 사용하였고, DMA(Differential Mobility Analyzer)[8]를 이용해 단분산 입자를 발생시킨 후 플라즈마 발생용기에 주입하여 플라즈마 변수 및 입자의 크기에 따른 하전특성을 조사하였다. 입자의 전하량은 패러데이 컵을 이용하여 입자를 포집한 다음 미세 전류계를 이용해 측정하였으며, 플라즈마의 각종 변수들은 평판형 랭뮤어 탐침(Langmuir probe)를 이용하여 측정하였다. 자기장은 플라즈마 용기에 인접해있는 코일을 사용하여 발생시켰다.

\*LG전자 생산기술원(hblues@lge.com)

\*\*한양대학교 기계공학과(khahn@hanyang.ac.kr)

\*\*\*한양대학교 과학기술부 응용물리학

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험을 위한 장치의 구성을 Fig. 1에 제시하였다. 실험장치의 구성을 살펴보면 다분산 입자를 발생시키는 분무 입자 발생기(atomizer), 입자의 수분을 제거하기 위한 확산건조기(diffusion dryer), 확산 건조기를 통과한 입자를 전기적으로 중화시켜 Boltzmann 하전 평형 상태로 만드는 중화기(neutralizer), 다분산 입자로부터 원하는 크기의 입자를 발생시키는 DMA(Differential Mobility Analyzer)와 강화유리로 제작된 플라즈마 발생 용기, 플라즈마 생성을 위한 직류 고전압 전원 장치, 입자의 개수 농도 측정을 위한 응축핵계수기(Condensation Nuclei Counter, CNC), 플라즈마를 통과해 전하를 띤입자를 포집하는 패러데이 컵, 패러데이 컵에 포집된 입자의 전류측정을 위한 전류계(electrometer), CNC와 전류계에서 발생한 신호의 저장 및 분석 장치와 소프트웨어, 플라즈마 발생 용기의 진공을 만들어 주는 로터리 진공 펌프, 그리고 플라즈마 진단을 위한 랭뮤어 탐침과 이에 전압을 인가하기 위한 전류 신호 발생기(function generator) 및 증폭기(amplifier), 탐침의 전류-전압 값을 출력하고 저장하기 위한 오실로스코프(oscilloscope)이다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 입자의 하전량 측정

NaCl 혹은  $Al_2O_3$  수용액을 분무입자 발생기(atomizer)에 넣고 다양한 크기의 입자를 발생시킨 다음에 입자를 둘러싼 수분을 제거하기 위해 확산건조기를 통과시켜 고체입자로 만든다.  $Al_2O_3$ (Alumina, Aluminum Oxide)는 재료의 소결공정에 많이 사용되며 밀도는  $3.97 \text{ g/cm}^3$ , 녹는점은  $2054^\circ\text{C}$ 로 매우 강한 결합력을 가지고 있다. 이 입자들을 방사능 동위 원소(radioactive

source)인 polonium210이 장착된 중화기를 통과시키면 전기적으로 중화되어(neutralized) Boltzmann 평형 하전 분포를 띠게 된다. 이렇게 생성된 다분산 입자를 DMA를 통과시켜 단분산 입자를 만들어 내며, 단분산 입자의 크기는 DMA에 인가하는 전압으로 조절한다. DMA에서 발생된 단분산 입자를 플라즈마 용기 상판에 연결된 니들 밸브를 통해 용기 내로 유입시킨다. 유입된 단분산 입자는 플라즈마 영역을 통과한 후 패러데이 컵에서 포집되고, 그 때의 전류를 전류계로 측정하여 입자의 전하량 및 극성을 구한다. 플라즈마 용기 내부의 진공은 로터리 펌프로 만들며, 최저 압력은  $19 \text{ mTorr}$  정도이다. 플라즈마에 자기장을 인가시켜주기 위하여 원형코일에 일정한 전류를 걸어주며, 플라즈마에 자기장이 인가되었을 때 입자의 하전량 측정은 위와 동일하다.

#### 2.2.2 입자의 하전량 측정

실험이 이루어진 플라즈마 용기내의 작동 압력은  $1.17 \text{ Torr}$ 이며 용기로 주입되는 공기의 유량은  $3 \text{ cm}^3/\text{s}$ 이다. 플라즈마를 발생시키기 위한 전극판의 간격은  $16.5 \text{ cm}$ 이며  $-440\text{V}$ ,  $-450\text{V}$ ,  $-460\text{V}$ ,  $-470\text{V}$ ,  $-500\text{V}$ 의 전압을 걸어주었다. 사용된 입자의 재질은 NaCl과  $Al_2O_3$ 이며 사용된 입자의 지름은  $0.03$ ,  $0.05$ ,  $0.07$ ,  $0.1$ ,  $0.12$ ,  $0.15 \mu\text{m}$ 이다. 플라즈마에 자기장을 걸어주기 위해 원형 코일에 인가된 전류의 세기는  $5$ ,  $10$ ,  $15$ ,  $20$ ,  $25$ ,  $30\text{A}$ 이며 이때 자기장의 세기는 각각  $1.6$ ,  $3.2$ ,  $4.8$ ,  $6.4$ ,  $8.0$ ,  $9.6 \text{ Gauss}$ 이다.

#### 2.2.3 플라즈마 진단

본 실험에서는 플라즈마 진단을 위해 구조가 매우 단순한 평판형 랭뮤어 탐침을 사용하였다. 플라즈마 진단을 위해 용기의 아래판을 통해 기차 모양(dog leg type)의 랭뮤어 탐침을 삽입하여 전극사이의 방전영역을 위에서 아래로 이동하며 플라즈마의 전류-전압 특성 곡선을 획득하여 분석하였으며, 플라즈마 내의 전자밀도가 균일하다고 가정하여 원형 전극의 중심부분을 측정하였다. 탐침에 인가하는 전압은 전류신호 발생기에서  $1\sim 2\text{volts}$  정도의 톱니파를 발생시켜 획득(gain)이 20인 증폭기(KEPCO bipolar operational power supply/amplifier)에 입력시킨 다음 출력된 것이다. 탐침으로 부터 얻은 전류-전압 값은 오실로스코프에 의해 저장된다. 플라즈마 진단을 위한 조건은 하전량 측정의 경우와 동일하다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 입자의 하전량 측정

#### 3.1.1 플라즈마 변수의 측정

입자가 궤도에 한정하여 운동하는 모델(orbital-

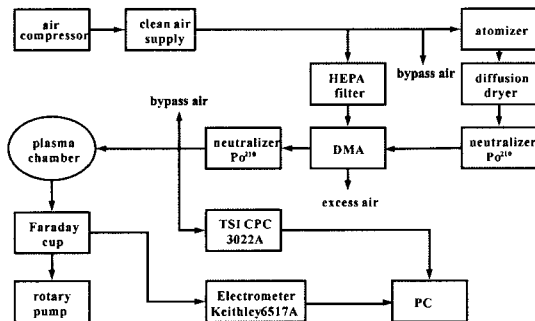


Fig. 1. Block diagram of apparatus.

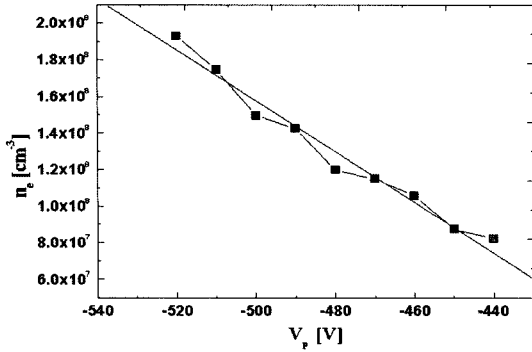


Fig. 2. Plasma electron density with applied electrode voltage.

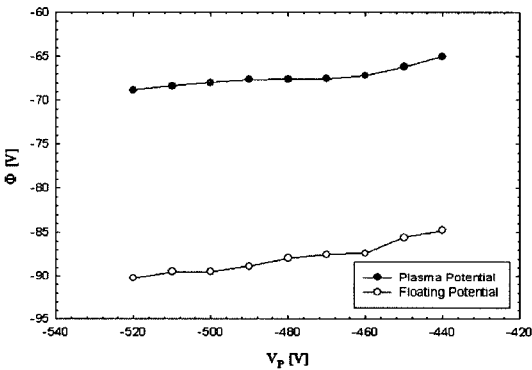


Fig. 3. Plasma and floating potential with plasma voltage.

motion-limited model)에 따른 기존의 이론적인 연구에서 입자의 하전은 플라즈마 조건과 입자 반지름에 의존한다고 예측되어 졌다. Fig. 2는 플라즈마를 발생시키기 위해 전극에 인가된 전압에 따른 플라즈마의 전자 밀도를 측정 한 결과로, 인가된 전위차가 증가할수록 전자 밀도는 선형적으로 증가한다. 따라서 전극에 인가된 전압이 증가할수록 입자의 하전량이 증가할 것으로 예측할 수 있다. Fig. 3은 인가된 전압에 따른 플라즈마 전위와 플로팅 전위를 나타낸 것이며 이 값들을 이론식에 대입함으로써 구형 정전 용량 모델을 적용한 이론적인 입자의 하전량을 구하게 된다. 플라즈마에 자기장이 인가될 경우 전자는 자기장에 의한 수 mm의 Lamour 반지름을 갖는 회전운동을 하게 된다. 이때 전자는 회전운동수(cyclotron frequency)라는 일정한 진동수를 가지게 된다. 따라서 전자의 운동이 활발해지기 때문에 입자의 하전량이 증가할것으로 예측할 수 있다. 그러나, 플라즈마에 자기장을 인가시켰을 때의 전자 밀도와 플라즈마 전위를 측정 한 Fig. 4과 5를 보면 자기장의 세기가 세질수록 전자 밀도와 전위는 오히려 감

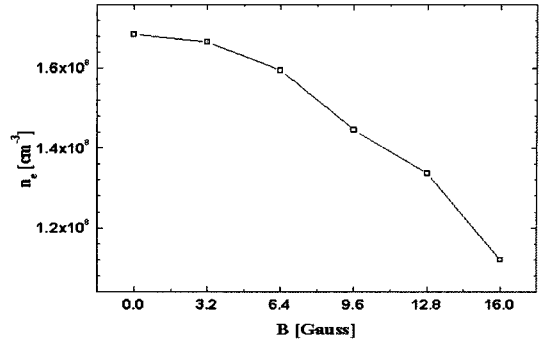


Fig. 4. Electron density of magnetized plasma (applied voltage: -500V).

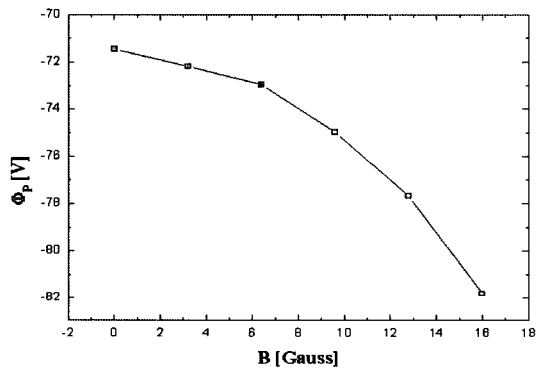


Fig. 5. Plasma potential of magnetized plasma (applied voltage: -500V).

소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전기장과 자기장이 동시에 존재할 때 생기는 E×B 드리프트(E×B drift) 현상에 의해 랭뮤어 탐침에 반응하는 플라즈마의 면적이 감소하며, 2차 전자가 발생하는 면적이 줄어들기 때문에 일어나는 현상이다.

3.1.2 자기장이 인가되지 않았을 때의 하전량

Fig. 6, 7은 플라즈마에 자기장이 인가되지 않았을

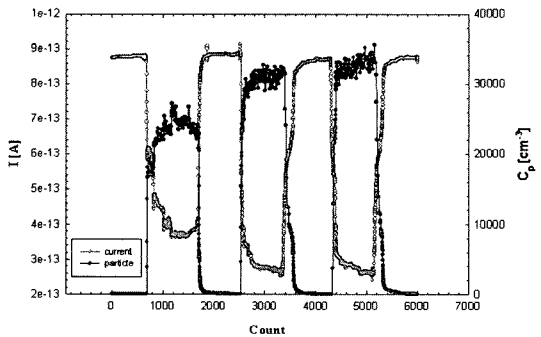


Fig. 6. Current variation by monodisperse particle embedded in plasma ( $Al_2O_3$ , -440V, 0.05 m).

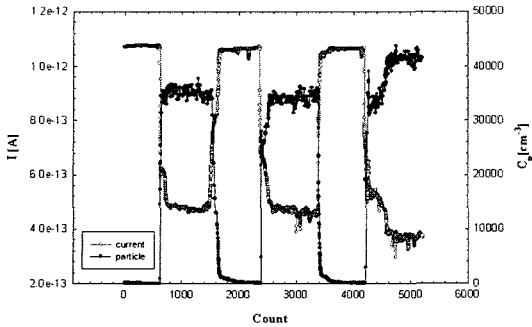


Fig. 7. Current variation by monodisperse particle embedded in plasma (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, -450V, 0.07 m).

때 주입되어 하전된 입자들에 의한 전류 변화를 나타낸 그래프로서 입자가 주입되면 전류가 감소하고 주입되지 않으면 증가하는 것이 뚜렷하게 나타나 있다. 이는 입자가 음으로 하전되는 것을 의미하며, 또한 이차 전자의 방출과정이 입자들을 양으로 하전시킬 만큼 많지 않거나 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 입자의 하전량은 그래프에 나타나있는 전류의 차와 입자의 개수를 이용해서 계산하게 된다. 입자의 하전량이 증가한다면 입자가 주입될 때와 주입되지 않을 때의 전류의 차이도 증가할 것이다. Fig. 8은 측정된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 하전량을 그래프로 나타낸 것으로 하전량이 입자의 크기에 비례하여 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 이 그래프는 플라즈마 내의 전자밀도가 증가할수록 입자의 하전량이 증가할 것이라는 일반적인 예측과는 일치하지 않는다. 이것은 플라즈마를 발생시키기 위해서 인가된 전압이 증가할수록 전자 밀도가 증가하지만 큰 변화를 가지지는 않기 때문으로 예측된다. Fig. 9는

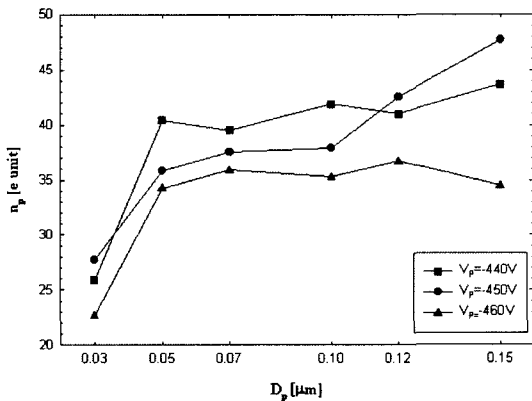


Fig. 8. Experimental charge number of a particle according to size (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

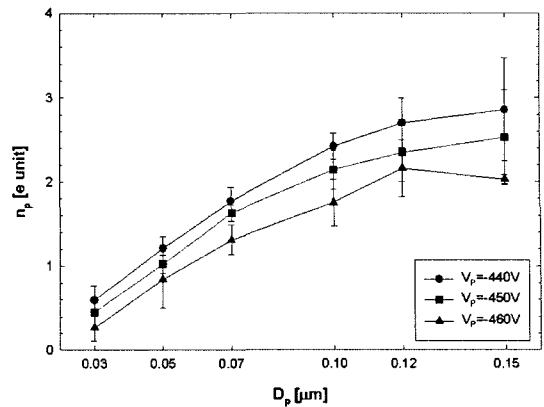


Fig. 9. Experimental charge number of a NaCl particle.

NaCl 입자를 사용하여 실험한 것으로, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 이용한 결과는 비교에 비해 전체적인 하전량이 작게 측정된다. 이것은 NaCl의 녹는점이 800.7°C로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 낮기 때문에 전자 전류에 의해 온도가 크게 상승한 플라즈마 영역내에서 소산되어 하전량이 적게 측정되는 것으로 예측된다.

### 3.1.3 자기장이 인가되었을때의 하전량

Fig. 4, 5에서 고려했듯이 자기장의 세기가 증가하면 2차 전자가 발생하는 면적이 줄어들기 때문에 전자 밀도와 플라즈마 전위는 감소한다. 또, 자기장이 인가되었을 때 발생하는 E×B 드리프트 현상 때문에 플라즈마가 한쪽 방향으로 밀려나가게 되면 입자와 전자가 충돌할 수 있는 플라즈마의 영역이 줄어들게 된다. Fig. 10은 인가된 전압이 -440V, 입자의 크기가 0.05 μm, 자기장이 인가되었을때 입자의 하전량을 측정할 결과이다. 자기장을 인가하지 않았을 때부터 4.8 Gauss

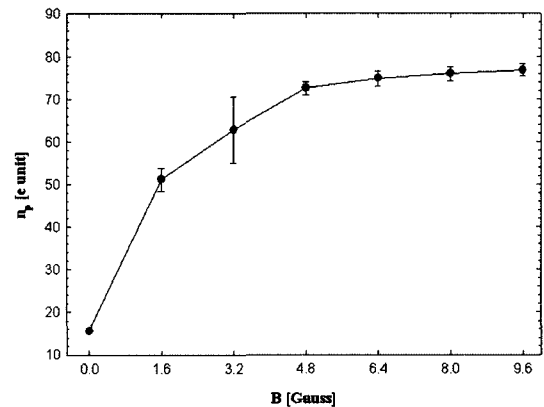


Fig. 10. Charge number with magnetic field (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, -440V, 0.05 μm).

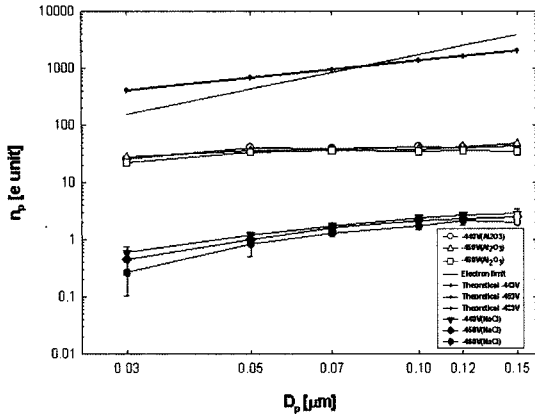


Fig. 11. Comparison of theoretical, experimental charge number and electron limit.

까지는 하전량이 크게 증가하다가 그 이후로는 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과를 Fig. 4, 5와 같이 고려해보면 전자 밀도가 감소하는 정도가 완만한 4.8 Gauss 이전에는 하전량이 크게 증가하다가 전자 밀도가 감소하는 정도가 이전보다 급격해지는 4.8 Gauss 이후 부분에서는 하전량의 증가가 완만해지는 것을 볼 수 있다. 이것은 자기장이 인가될수록 전자의 회전운동이 활발해져서 입자의 하전량이 증가하고, E×B 드리프트의 영향으로 입자가 반응하는 플라즈마의 영역이 줄어들고 전자 밀도가 감소해도 전자의 회전운동이 하전에 미치는 영향이 지배적인 것을 나타낸다.

3.2 실험결과와 이론의 비교 및 검토

입자의 하전에 대하여 구형 정전 용량 모델(spherical capacitor model)[9]을 가정하면, 플라즈마 내에서 입자가 가지는 이론적인 평형 전하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q=C\Phi \tag{1}$$

위의 식에 Fig. 4, 5의 값들을 대입하여 하전량의 이론 값을 구한다. Fig. 11은 각 실험 결과에 각 입자 하나당 최대 하전될 수 있는 한계(electron limit)와 식 (1)에서 얻은 각 전압에서의 이론상의 하전량을 각각 선형 보완하여 나타낸 것이다. 입자의 크기가 작을 때 이론상의 하전량이 전자 한계를 넘는 것은 랭뮤어 탐침으로 측정된 플라즈마 전위와 플로팅 전위 값의 오차 때문인 것으로 예상된다. 실험으로 얻은 입자의 하전량의 범위는 차이가 있지만, 전체적으로 입자의 하전량은 입자의 크기가 커질수록, 그리고 플라즈마에 인가되는 전위차가 커질수록 증가하는 경향을 보인다. 이론

상의 하전량은 실험치의 약 20배 정도로 크다. 실험에 의해 측정된 하전량이 이론치에 비해 대단히 작은 원인을 추정해 보면 다음과 같다.

- 1) 니들 밸브를 빠져 나온 공기가 급격히 팽창함으로써 입자들이 플라즈마 영역을 비켜갔을 가능성이 있다.
- 2) 하전된 입자들이 플라즈마와 쉬스(sheath)의 경계에 포집되어 손실되었을 가능성이 있다.
- 3) 하전된 입자들이 전극에 침착되어 손실되었을 가능성이 있다.
- 4) 밸브에서의 입자 침착 손실과 플라즈마 용기 내에서의, 그리고 플라즈마 용기와 패러데이 컵을 연결하고 있는 금속관에서 입자가 침착되어 손실되었을 가능성이 있다.

4. 결 론

DC 플라즈마 내에 단분산의 NaCl과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 주입하여 그 하전량을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 입자의 하전량은 입자의 크기에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있으며 이 경향은 구형 정전 용량 모델과 일치하나 대략 1/20 정도로 오차가 컸다.
2. 실험에서 전극에 인가된 전압에 따른 플라즈마내의 전자 밀도의 변화가 크지 않아서 입자의 크기에 따른 하전량은 미소한 차이만 보이지만, 전자 밀도가 크게 차이나는 경우 하전량은 많은 증가를 보인다. 이것으로 플라즈마 내의 전자 밀도가 증가할수록 입자의 하전량이 증가하는 것을 알 수 있다.
3. 입자의 하전량은 플라즈마에 인가된 자기장의 세기에 비례하여 증가한다. E×B 드리프트 현상에 의해 입자가 반응하는 영역이 줄어들어도 하전량은 증가하며 이는 자기장에 의한 전자의 회전 운동 증가가 입자의 하전에 지배적인 영향을 끼치는 것을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 두뇌 한국21(Brain Korea 21) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. McCaughey, M.J., Kushner, M.J., A model for particulate contaminated glow discharges, "Journal of Applied Physics", 69(10), (1991).
2. Selwyn, G.S, Patterson, E.F. Plasma Particulate Con-

- tamination Control. II. Self-cleaning Tool Design, *Journal of Vacuum Science and Technology, A* 10(4), (1992).
3. Cui, C., Goree, J., Fluctuations of the charge on a dust grain in a plasma, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 22(2), pp.151-158, pp. 91-96 (1994).
  4. Choi, S.J., Kushner, M.J., A particle-in-cell simulation of dust charging and shielding in low pressure glow discharges, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 022(2), pp. 138-150 (1994).
  5. Alexeff, I., Pace, M., A Dust Plasma, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 22(2), (1994).
  6. Hazelton, R.C., Yadlowsky, E.J., Measurement of dust grain charging in a Laboratory Plasma, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 22(2), (1994).
  7. Walch, B., Horanyi, M. and Robertson, S., Measurement of the charging of individual dust grains in a Plasma, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 22(2), pp. 97-102 (1994).
  8. 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, "Differential Mobility Analyzer(DMA)내의 입자운동 및 특성 분석", *대한기계학회논문집(B)*, 20(6), pp. 2005-2013 (1996).
  9. Whipple, F.C., "Potentials of Surfaces in Space", *Rep. Prog. Phys.*, 44, pp. 1198-1250 (1981).