

## 펄스전압을 적용한 전하중화장치의 이온발생 특성

문 재덕\*, 정 석환\*

## The Ion Generation Characteristics of Charge Neutralizer Applied a Pulse Voltage

Jae-Duk Moon\*, Suk-Hwan Chung\*

## 요 약

정전기는 고집적 반도체소자의 제조공정에서 제품의 제조수율을 감소시키거나, 정전하에 의해 가스폭발이나 화재 등을 일으키는 원인이 되므로 정전기를 제거하기 위한 수단이나 장치가 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 전하중화장치의 사용시간 경과에 따른 침전극 마모 및 분진부착 특성에 대해서 실험적으로 연구하였다. 또한 전하중화장치의 침전극의 마모 최소화와 발생이온량의 정량적인 제어를 위해 인가전원을 종래의 교류전원 대신에 고주파 펄스전원으로 하여 펄스주파수 및 펄스의 시비율을 변화시킴으로서, 펄스전력을 유효하게 제어할 수 있었으며, 또 펄스전원을 사용함으로써 전하중화장치의 이온 발생특성을 크게 할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

## Abstract

Methods and systems to remove static electricity are requested necessarily because the static electricity causes a flammable gas explosion, a fire, reduction of production rate in manufacturing VLSI semiconductor device and so on.

In this paper, abrasion and dust contaminant of needle electrode are studied experimentally. And, frequencies and pulse durations of a high frequency pulse source were controlled effectively to minimize the abrasion of needle electrode and control generated numbers of ions.

As a result, it is verified experimentally that the ion generation of charge neutralizer increases by using a high frequency pulse source.

## 1. 서 론

정전기는 절연성이 매우 높은 물체와 인접한 물체간의 접촉, 마찰, 剝離 등의 작용으로 발생한 전하이동과 축적에 의해 발생되며,<sup>[1,2]</sup> 방전이나 쿨롬력(Coulomb force)에 의한 분진의 부착등 다양한 현상을 일으킨

다.<sup>[3]</sup> 이와 같은 현상이 고집적 반도체소자의 제조공정에서는 정전파괴 및 분진의 부착 등을 유발시켜 제품의 제조수율을 감소시키거나,<sup>[4]</sup> 가연성 가스 분위기에서는 가스폭발이나 화재 등을 일으킬 수 있는 직접적인 원인이 되기도 한다.<sup>[5]</sup> 따라서 산업현장에서는 정전기를 제거하기 위한 수단이나 장치가 필수적으로 요구된다.<sup>[6,7]</sup>

정전기를 제거하는 방법으로 코로나방전에 의한 전하중화법, 수증기 가습법, 방사선 조사에 의한 공기의

\* 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronics and Electrical Engineering Kyungpook National University)

<접수일자 : 1998년 2월 2일>

전리법, 접지법, 대전 방지제의 사용법 등이 있다.<sup>[8,9,10]</sup> 이들 중에서 가습법은 저 습도 분위기가 요구되는 장소에서의 사용이 곤란하며, 방사선 조사 법은 방사능의 위험성 때문에 사용할 때 항상 주의를 요한다. 또한 접지법은 장비의 재료가 도전성인경우에 한해서 사용이 가능하고, 대전방지제는 그 성분물질이 다른 물질과 반응하거나 전하중화능력이 오래가지 못하는 등의 단점이 있다.

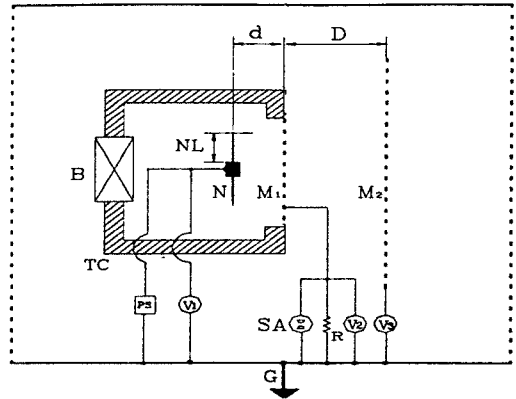
전하중화법은 금속침 전극에 코로나방전을 일으켜 음, 양의 이온을 발생시키고, 이때 발생된 양, 음의 공기이온이 전하를 직접 중화시키거나, 전하 완화경로의 공기 전도성을 높여, 전하의 축적을 방지하는 방법이다. 따라서 전하중화법은 사용분위기 조건에 제약을 받지 않고 광범위하게 사용될 수 있는 장점이 있다.<sup>[11]</sup> 그러나 전하중화법은 방전에 의해 금속 침전극의 마모를 일으키며 또한 분진을 부착시키기도 하고,<sup>[8]</sup> 특히 이렇게 발생된 금속 분진은 고집적 반도체소자 제조 시는 치명적인 장애를 줄 수 있다.<sup>[8]</sup> 또한 방전에 의한 부산물로 오존이나 질소산화물과 같은 유해가스 발생 등의 문제가 생길 수 있다.<sup>[12,13]</sup>

한편, 현재 많이 사용되고 있는 교류전원을 사용하는 전하중화장치의 경우 교류코로나 방전에 의해 발생하는 이온량의 절대량이 적으며, 효과적이고 정량적인 제어가 곤란하다. 또한 전하중화장치로부터 발생하는 이온량의 적절한 측정법이 현재의 산업체에서는 확정되어 있지 않기 때문에 대전된 정전하를 제거하기 위한 최적 이온발생 조건도출 및 적정제어가 어려운 실정이다. 교류전원 사용상의 문제점 해결을 위하여 펄스전압을 인가하는 방식이 미국의 이온 시스템사(Ion System, U.S.A.)등에서 연구된 바 있다. 그러나 고정 펄스를 사용하여 발생이온량의 증가는 가능 하지만 필요에 따라 적정량으로 발생이온량을 제어 할 수 있는 기능은 발표 된 바 없다.

본 논문에서는 전하중화장치의 사용시간 경과에 따른 침전극 마모 및 분진부착 특성에 대해서 실험적으로 연구하여 방전침 사용시의 문제점을 검토하고 개선 방안을 제시하고자 하였다. 전하중화장치의 발생이온량의 정량적인 제어를 하기 위해 인가전원을 종래의 교류전원 대신에 고주파 펄스전원으로 하여 펄스주파수 및 펄스의 시비율을 변화시킴으로서, 펄스전력을 제어할 수 있는 가능성과, 발생이온량을 정밀하게 측정할 수 있는 전하량 정밀 측정 장치를 제작하여 이들의 이온 발생특성을 비교 검토하였다.

## II. 실험장치 및 방법

그림 1은 현재 현장에 사용되고 있는 전하중화장치(Kostat. Model KS-103, (주)윤호)를 사용한 실험장치 개략도와 본 실험을 위해 정밀 제작한 전하량 측정장치의 개략도를 나타낸 것이다. 전하중화장치에서의 이온은 침(needle, N)과 접지된 평판전극(mesh electrode, M<sub>1</sub>)의 방전공간에서 발생하여 송풍기(blower, B)에 의해 전하중화장치 외부로 이동되게 된다. 이렇게 이동된 이온은 이온포집전극(ion collector, M<sub>2</sub>)에 포집 된다. 방전침 전극은 곡률반경 50 [μm], 침 길이(needle length, NL) 10.0 [mm]로서 방전에 의한 침 전극의 마모를 최소화하기 위해 스테인레스(SUS304)재질을 사용하였다. 완성된 침전극은 침전극 지지금속막대(단면 5×5 mm<sup>2</sup>, 길이 160 mm)의 양 방향으로 5개씩 서로 엇갈리게 20[mm]간격으로 배치하여 총 10개를 설치하였다. 접지된 그물전극(M<sub>1</sub>)은 발생된 이온의 통과를 용이하게 하기 위하여 20 [mesh]의 그물형으로 제작하였으며, 전극



- |                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| B : blower                      | PS : high voltage               |
| D : ion migration distance      | R : shunt resistor              |
| d : needle-to-mesh spacing      | SA : surge arrester             |
| G : ground                      | TC : tin chamber                |
| M <sub>1</sub> : mesh electrode | V <sub>1</sub> : input voltage  |
| M <sub>2</sub> : ion collector  | V <sub>2</sub> : corona current |
| N : needle electrode            | V <sub>3</sub> : ion current    |
| NL : needle length              |                                 |

그림 1. 전하중화장치 및 전하량 측정장치 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of ionizer and charge measuring system

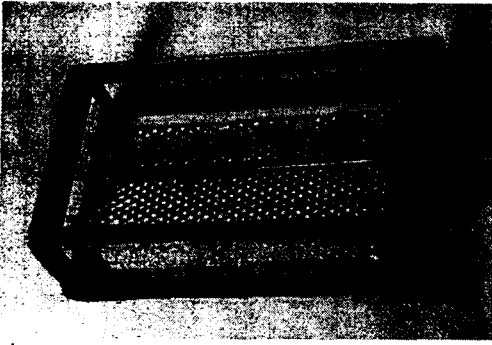


그림 2. 전하중화장치 전극의 실물사진  
Fig. 2. Photograph of ionizer electrode

의 산화를 방지하기 위해 알루미늄(Al)재질을 사용하였다. 침 전극과 그물형 전극사이의 간격(needle-to-mesh spacing,  $d$ )은 10.0 [mm]로 고정하여 실험하였으며 그림 2는 실물 사진이다. 전하중화장치로부터 발생하는 이온량을 정량적으로 측정하기 위해 설계 제조된 이온포집전극(ion collecting electrode,  $M_2$ )은 가로 350[mm], 세로 300[mm]의 32 [mesh]철망을 4점으로 하여 도달이온을 가능한 한 전량 포집 되게 하였다.

전술했듯이, 종래의 교류형 전하중화장치는 발생하는 이온량의 정량적인 제어가 불가능한 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 발생 이온량의 정량적 제어가능성 검토를 위해 인가전원(power supply, PS)을 가변 주파수, 가변 시비율(duty ratio) 펄스전원으로 대체하여 인

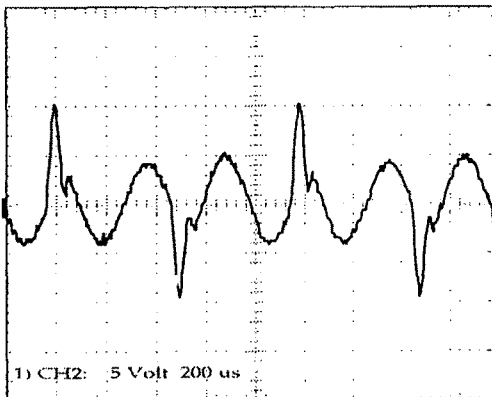


그림 3. 1 [kHz], 20 [%] 시비율 펄스전압 파형  
Fig. 3. Pulse voltage wave form of 1 [kHz], 20 [%] duty cycle

가펄스전원의 주파수와 시비율을 변수로 하여 실험하였다. 즉, 주파수는 고정된 시비율 20[%]에서 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 [kHz]로 변화 시켰으며, 시비율은 고정된 주파수 1.00[kHz]에서 8, 10, 12.5, 15.0, 17.5, 20, 25.0, 30, 40 [%]로 변화시켜서 인가하였다. 주파수 1 [kHz], 시비율 20 [%] 인 펄스전압 파형을 그림 3에 나타내었다. 포집 되는 이온량을 측정하기 위해 입력임피던스가 10[MΩ] 축적형 오실로스코프(Tektronix, TDS360, U.S.A)로 이온 포집전극의 전압( $V_3$ )을 실효값으로 측정하였다. 이 전압을 옴의 법칙을 이용하여 전류로 환산하면 다음에 의하여 이온포집전극에 도달하는 전자의 개수를 식(1)로부터 계산 할 수 있다.

$$\Delta q = \Delta i \Delta t = Ne \quad (1)$$

여기서  $\Delta i$ 는 CRO상의 전류,  $e$ 는  $1.609 \times 10^{-19}$  [C]  $N$ 은 이온의 총수를 나타낸다.

이때 발생하는 음 및 양이온의 대전량은 대기중 1 기압 하에서는 평균자유행정(mean free path)이 크기 때문에 전자 한 개가 하나 크기만의 이온이라고 가정하면 초당 포집 되는 전자의 개수를 초당 발생하는 이온의 수로 볼 수 있게 된다. 이 경우 발생하는 총 이온의 수  $N$ 은 식 (2)로써 결정 할 수 있으며, 본 연구에서의 이온 수는 식 (2)에 의해 모두 계산하였다.

$$N = \frac{\Delta i}{e \Delta t} \text{ [ea/sec]} \quad (2)$$

$$\Delta t = 1 \text{ [sec]}$$

인가전압은 고전압 프로브(Tektronix, P6015A, U.S.A)를 사용하였으며, 방전전류는 정밀저항(1.000 [kΩ]) 양단의 전압을 오실로스코프로 측정하여 전류로 계산하였다.

침전극의 마모상태와 침전극상의 분진 부착특성을 조사하기 위해 상용교류전원으로 100[μA]의 고정 방전전류를 흘리면서 10, 20, 50, 100시간마다 전류-전압 특성조사 및 침전극 선단의 50배 확대사진을 촬영하였다. 모든 실험은 외부 노이즈(noise)로부터 차폐하기 위하여 접지된 금속챔버(tin chamber)내부에 설치하여 수행하였으며, 온도도는 실온 실험상태로 하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 침 전극의 마모상태를 확인하기 위하여 60

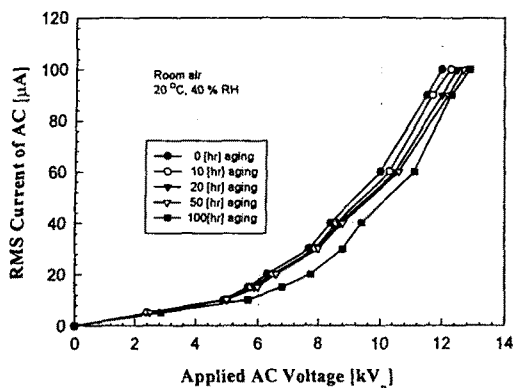
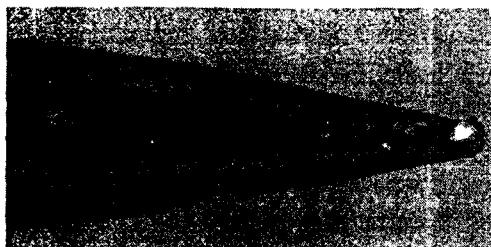


그림 4. 동작시간에 따른 전류-전압특성  
 Fig. 4. Time dependence of I-V characteristics of ionizer set

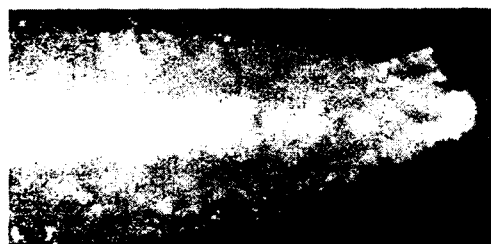
[Hz] 교류전원을 사용하고 방전전류를 100[μA]로 고정하여 인가하였을 때의 0, 10, 20, 50, 100시간마다의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 그림 4에서 보는바와 같이 전하중화장치의 전류-전압특성은 전형적인 침대 평판형 전극계와 동일한 특성을 보여준다. 그러나 작동시간의 경과에 따라 전류-전압 특성의 기울기가 완만해지는 경향을 보여준다. 즉, 장치의 작동초기에는 100 [μA]의 방전전류를 흘리기 위해 약 12.0 [kV]가 인가되었으나 시간이 경과함에 따라 같은 전류를 흘리기 위해서 더 높은 전압이 필요하게 되고 약 100시간 후에는 약 12.9 [kV]가 인가되었다. 이와 같은 전류-전압의 특성변화 원인을 실험적으로 조사하기 위해 작동시간 경과에 따라 침전극 선단의 확대사진을 촬영하였다. 그림 5와 그림 6은 교류전압을 인가하여 100[μA]의 전류



(a) before operated

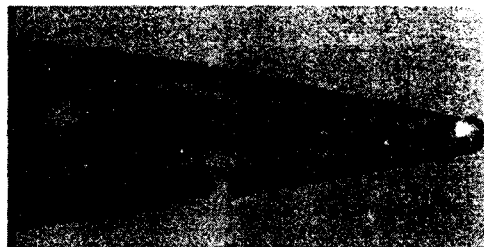


(b) after 50 hrs operated

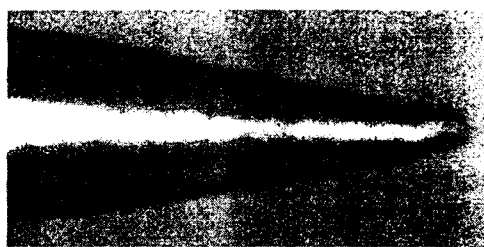


(c) after 100 hrs operated

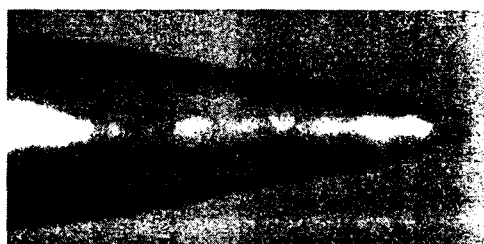
그림 5. 방전 침의 분진 부착 사진  
 Fig. 5. Photos of discharge needle points with contaminated dust particles



(a) before operated and then cleaned



(b) after 50 hrs operated and then cleaned



(c) after 100 hrs operated and then cleaned

그림 6. 방전 침전극의 마모상태 사진  
 Fig. 6. Photos of cleaned needle points

를 100시간 흘렸을 때의 방전침 선단의 50배 사진으로 그림 5는 먼지부착상태 그대로이며, 그림 6은 부착먼지를 벤젠으로 세정했을 때의 것을 보여준다. 그림 5에서 보는바와 같이 침전극의 선단은 작동시간의 경과에 따라 정전력<sup>[3]</sup>과 전계경사력(electrical field gradient force)<sup>[14]</sup>에 의해 분위기공기중의 먼지들이 크게 부착하는 것을 보여 준다. 이와 같은 먼지들은 침전극 선단의 전계를 완화함은 물론 침전극으로 부터의 이온이동을 저하시킴으로서 침의 방전성을 저하시키게 됨을 보여 준다. 그림 6에서는 침선단이 방전시의 이온들과의 충돌에 의한 대·소이전(gross and fine wanderung)<sup>[15]</sup>현상으로 말미암아 마모 되었음을 보여준다. 따라서 방전식 정전중화장치는 침 전극의 마모와 분진의 부착으로 인해서 시간이 경과함에 따라 그 성능에 많은 차이가 발생 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 전하중화장치의 전원을 펄스전원으로 하여 1[kHz]고주파 펄스전원의 시비율 변화에 따른 인가전압-발생이온 특성과 상용교류전원사용 전하중화장치의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 펄스의 시비율이 8[%]에서 10, 20[%]로 상승함에 따라 이온발생 개시전압이 2.2, 1.5, 1.3[kV]로 감소하고, 발생이온량은 56, 62, 70 [ $\times 10^9$  ea/sec]로 증가하여 20[%]에서 이온발생 개시전압은 최소로 되면서 발생이온량은 최대 값이 되었다. 한편 펄스 시비율이 30, 40[%]로 증가 할 경우의 이온발생 개시전압은 1.6, 1.8[kV]로 점차 커지고 발생이온량은 61, 58 [ $\times 10^9$  ea/sec]로 감소하였다. 이는 10[%]

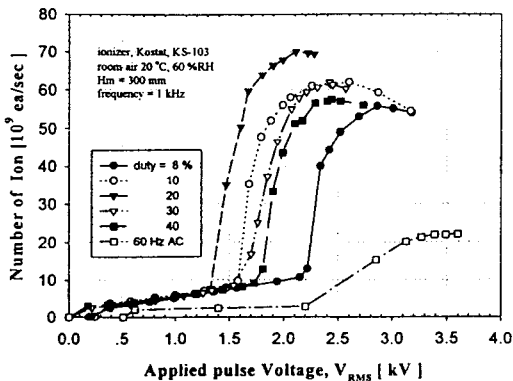


그림 7. 인가펄스 시비율 변화에 의한 발생이온수-전압 특성  
Fig. 7.  $I_K$ -V characteristics as a function of applied pulse duration

이하의 시비율에서는 발생된 이온이 공간으로 확산되기 위한 전계지속시간이 불충분하여 발생이온량이 적으며, 30[%]이상의 시비율에서는 지속되는 전계의 힘에 의해 발생한 이온이 외부로 나오는 량보다 그물형 평판전극으로 이동하는 것이 많기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 본 실험장치 구조의 경우에는 펄스전원의 시비율-발생이온의 특성은 시비율이 20[%]에서 최적의 이온발생 특성을 보여주며, 이 결과는 시비율을 가변 시킴으로 발생이온량을 조절할 수도 있으며, 또한 최적화 할 수도 있음을 보여준다. 이와 같은 가능성은 펄스시비율-발생이온특성을 나타낸 그림 8로부터 확실히 알 수 있다.

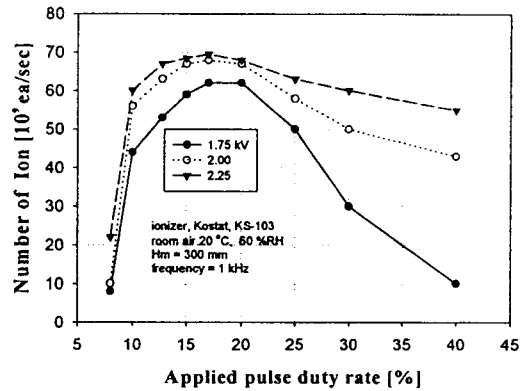


그림 8. 인가펄스 시비율에 의한 발생이온 특성  
Fig. 8. Ion generation as a function of applied pulse duration

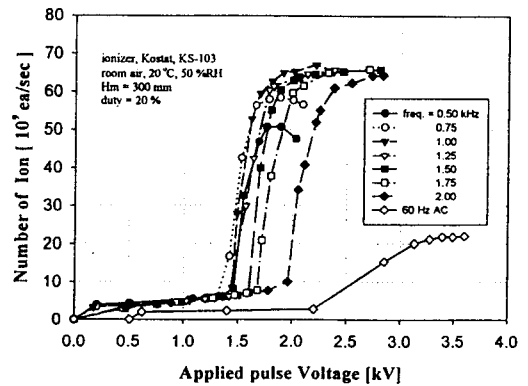


그림 9. 인가펄스 주파수변화에 의한 발생이온수-전압특성  
Fig. 9.  $I_K$ -V characteristics as a function of applied pulse frequency

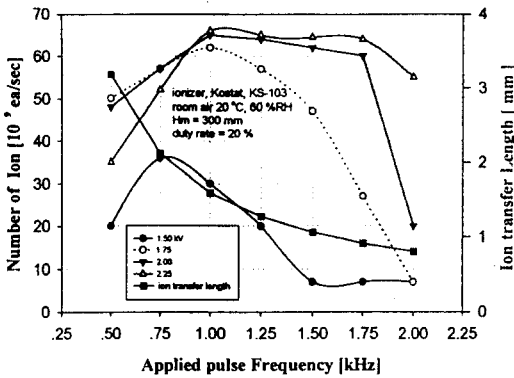


그림 10. 인가펄스 주파수에 의한 발생이온 및 이온 이동거리 특성

Fig. 10. Characteristics of generated ion and ion transfer as a function of applied pulse frequency

펄스시비율을 20[%]로 고정하고 펄스전원의 주파수를 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00[kHz]로 변화시키면서 인가전압-발생이온의 특성을 그림 9에 나타내었다. 한편 그림 7과 그림 9에서 나타나는 발생 이온의 포화현상은 방전의 형태(mode)가 글로우(glow)상태에서 브러쉬(brush)상태로 진전하여 이온의 이동거리가 짧아져서 외부로 나오지 못하고 곧바로 그물형 평판전극으로 이동하여 중화되어 버려서 나타난 결과인 것으로 사료된다. 그림 9에서 보는바와 같이 펄스전원의 주파수-발생이온 특성은 주파수가 1.00[kHz]에서 가장 많은 이온 발생특성을 나타내는 경향을 보여주어 발생이온이 주파수 의존성이 있음을 보여준다. 따라서 펄스 주파수-발생이온 특성을 그림 10에 나타내었다. 이와 같이 발생이온이 펄스주파수에 의존하는 이유는 펄스 주파수가 0.75[kHz]까지는 전계지속시간이 너무 길어서 발생이온이 그물형 평판전극으로 곧바로 이동하게 되고, 1.25 [kHz]이상의 주파수에서는 전계지속 시간이 불충분하여 방전에 의해 발생된 이온이 공간으로 충분히 확산되지 못하기 때문으로 사료된다.

이와 같은 현상은 방전공간에서의 하전입자의 이동에 관한 다음의 이론으로 설명 할 수 있다. 즉, 하전입자의 공기중의 역학 방정식은 식 (3)과 같으며, 이 방정식으로 이동속도(migration velocity,  $\omega$ )는 식 (4)와 같이 나타내어진다.

$$m \frac{d\omega}{dt} = qE - 6\pi\eta a\omega \quad (3)$$

$$\omega = \frac{qE}{6\pi\eta a} (1 - e^{-(6\pi\eta/m)t}) \quad (4)$$

여기서  $m$ 은 입자질량,  $\eta$ 는 점성(viscosity)계수,  $a$ 는 입자경,  $E$ 는 인가 전계(electric field)이다. 또한 입자경이 1 [ $\mu\text{m}$ ]이하가 되면 식 (4)에서 두번째 항은 무시 될 수 있으므로 보정계수(Cunningham correction factor,  $C_m$ )를 적용하면 식 (5)와같이 간략하게 쓸 수 있다.<sup>[16]</sup>

$$\omega = \frac{C_m q E}{6\pi\eta a} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

본 실험에서는 실내공기를 사용하므로 공기조성의 약 80[%]에 해당하는 질소가스를 기준으로 계산한 결과를 그림 10에 나타내었다. 따라서 고주파 펄스를 적용한 전하중화장치에서는 이온의 방전 공간상 이동거리와 전극간격이 이온량에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 이는 곧 인가 펄스전원의 주파수와 시비율을 변화시킴으로서 발생 이온 량의 정량적인 제어가 가능함을 의미하게 된다.

본 실험에 사용한 전하중화장치의 경우 펄스 시비율을 8[%]에서 40[%]로 변화시킴에 따라 발생 이온량은  $10 \sim 70 [\times 10^9 \text{ ea/sec}]$ 까지 가변 시킬 수 있었으며, 일정 시비율에서 펄스의 주파수를 0.50~2.00[kHz]로 변화시킴으로 인해 발생 이온량은  $6 \sim 67 \times 10^9 [\text{ea/sec}]$ 까지 가변 시킬 수 있게 되었다.

최대 이온 발생조건은 그림 8과 그림 10의 결과로부터 시비율 20[%], 주파수 1.00[kHz]임을 알 수 있으며, 이는 침전극과 그물형 평판전극간의 간격 및 구조가 변경되면 또 다른 최적조건이 있을 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

전하중화장치의 침전극 마모 및 분진부착 특성을 실험적으로 조사하기 위해 상용 교류 전원을 인가하여 침전극 변화상태를 조사하였다. 그리고 발생 이온량의 정량적 제어를 위해 인가전원을 고주파 펄스전압으로 대체하여 펄스주파수 및 펄스의 시비율을 변화 시켰을 때의 이온 발생특성을 실험적으로 연구하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 침전극의 마모 및 분진의 부착에 의해 100[hr] 동작후 방전전류는 약 100[ $\mu\text{A}$ ]에서 80[ $\mu\text{A}$ ]로 감소하였다.

2. 인가전원을 상용교류 고전압에서 고주파 펄스전원으로 하였을 경우 최대 3배의 더 많은 이온발생이 가능함을 확인하였다.

3. 발생 이온량의 정량적인 제어 범위는 펄스의 시비율 8~40[%] 변화에 따라  $10 \sim 70 [\times 10^9 \text{ ea/sec}]$ 까지 가변 가능하였고, 펄스의 주파수를 0.50~2.00[kHz]로 변화시킴으로 인해  $6 \sim 67 [\times 10^9 \text{ ea/sec}]$ 까지 가변시킬 수 있었다.

4. 본 연구에서 사용된 전하 중화장치로 최대이온을 발생시키기 위한 전원의 조건은 시비율 20[%], 주파수 1.00[kHz]인 펄스전원임이 확인되었으며, 이때 최대 이온 발생량은 약  $70 [\times 10^9 \text{ ea/sec}]$ 이었다.

## 사 사

본 논문은 (주) 윤호실업(대표이사 변호산)의 연구비 지원으로 수행되었음을 알리며 감사드립니다.

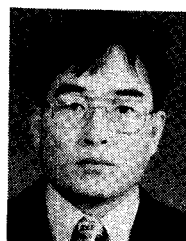
## 참 고 문 헌

- [1] 日本 靜電氣學會, “固体, 粉体の帯電”, 靜電氣ハンドブック, pp. 55~105, 1981.
- [2] 손병기, 문제덕, “고분자 고체유전물질의 수은과의 접촉대전”, 경북대 산업연구소보, vol. 3, pp. 84~89, 1975
- [3] 日本 靜電氣學會, “靜電氣による力學現象”, 靜電氣ハンドブック, pp. 251~313, 1981.
- [4] 田畜, 兒玉, “産業安全研究所技術資料”, RIIS-Tn-74, 1974.
- [5] 日本 靜電氣學會, “放電による着火爆發災害”, 靜電氣ハンドブック, pp. 731~777, 1981.
- [6] Simco Japan, “生産性にはず靜電氣の影響”, 1994.
- [7] Static control services INC., “Ionization and the Semiconductor Industry”, 1991.
- [8] 日本 靜電氣學會, “靜電氣の安全管理”, 靜電氣ハンドブック, pp. 797~862, 1981.
- [9] J. M. Meek and J. D. Craggs, “Corona Discharges”, Electrical Breakdown of Gases, pp. 319~384, 1978.
- [10] 손병기, 문제덕, “단속속 정전측정기의 제작”, 경북대 교육대학원 논문집, vol. 5, pp. 261~267, 1974
- [11] 김정호, 문용승, “건물의 실내공기 청정용 분진 중성화 및 응집장치의 기술적 원리”, 공기청정기술, 제 9권, 제 4호, pp. 29~40, 1996.
- [12] Judy A. Dorsey, Jane H. Davidson, “Ozone Production in Electrostatic Air Cleaners with Contaminated Electrode”, IEEE, IA-30, N02, pp. 370~375, 1994.
- [13] Eliasson and U. Kogelschatz, “N<sub>2</sub>O Formation in Ozonizers”, Journal de Chimie Physique, 1986.
- [14] A. D. Moore, “Nonuniform Field Effect”, Electrostatics and its Applications, pp. 335~362, 1973.
- [15] 姜衡富, “特殊導電材料”, 電氣·電子材料, pp. 244~246, 1995.
- [16] Harry J. White, “Particle Kinetics”, Industrial Electrostatic Precipitation, pp. 155~159, 1963.

## 著 者 紹 介

### 문 제 덕(文在德)

「센서학회지 제2권 제1호」논문93-09, p.74참조  
현재 경북대학교 전자·전기공학부 교수



### 정 석 환(鄭石煥)

1965년 4월 3일생. 1991년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학사), 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 ~ 현재 경북대학교 대학원 박사과정 재학중