

대기압 글로우 방전의 구현 및 안정화에 대한 실험적 연구

최 상 원

한국산업안전공단 산업안전보건연구원

(2008. 2. 4. 접수 / 2008. 8. 12. 채택)

An Experimental Study on the Implementation and Stabilization of Atmospheric Pressure Glow Discharge

Sang-Won Choi

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA

(Received February 4, 2008 / Accepted August 12, 2008)

Abstract : Ionizers are essential in various areas of manufacturing industries to protect electrostatic hazards and to reduce inferior products. For ion sources used in the charge neutralizers, there are corona discharge, soft X-ray, ultra-violet and glow discharge. Glow discharge has lots of attractive properties, such as lower discharge sustaining voltage, no generation of ozone, and so on. In this paper, we did an experimental study to trace the mechanism and stabilization of atmospheric pressure glow discharge using the several size and shape of electrodes. As an experimental result, to sustain conditions of atmospheric pressure glow discharge is that discharge voltage is 360V, discharge current is 12mA, apply frequency is 1kHz between electrodes when positive electrode is molybdenum(Mo) and negative electrode is copper(Cu). We confirmed that the mechanism and stabilization of atmospheric glow discharge is deeply concerned with the shape and material of electrode for discharge. Especially, glow discharge in atmospheric pressure was well generated and sustained according with the physical properties used electrode materials, example melting point, thermal conductivity, and etc.

Key Words : ionizer, charge neutralizer, atmospheric pressure, glow discharge, electrode material

1. 서론

글로우 방전은 코로나 방전에 비해 낮은 방전유지전압, 자속(self-sustain)방전 및 오존생성이 발생하지 않는 특징을 갖는다¹⁾.

글로우 방전은 일반적으로 수 mmHg 이하의 압력에서 잘 발생되기 때문에 이를 대기압 상태에서 사용되는 제전기로 응용할 수 없었다. 그러나 정전기 제거를 위한 이온원으로서 글로우 방전을 이용한 제전기는 최근에 와서 많이 연구되고 있다²⁾.

상온·상압에서 글로우 방전을 발생시키려면 고주파 전원 등을 사용하여야 한다³⁻⁵⁾.

더욱이, 글로우 방전은 산업안전의 측면에서 볼 때 아크방전에 비해 최소점화에너지가 높아 산업현장으로의 응용가능성이 높다^{6,7)}.

본 논문에서는 코로나 방전 및 아크방전에 비해 몇 가지 특징을 갖는 글로우 방전을 대기압 하에

서 발생시키는 최적의 전극 메커니즘 및 안정화에 대하여 실험적으로 규명하고자 하였다.

2. 글로우 방전의 특성

글로우 방전의 발생 메커니즘은 초전도 현상의 발견과 같이 그 이론은 오래 전에 발표되었지만 이를 상온·상압 하에서 발생시키는 글로우 방전 기술은 1986년부터 제안되기 시작하였다.

글로우 방전은 일반적으로 수 mmHg 이하의 압력에서 다음과 같은 조건일 때 잘 발생된다¹⁾.

- 1 kHz 이상의 전원 이용
- 2개의 금속전극 사이에 유전체 판 삽입
- 헬륨 희석가스 사용

이때의 글로우 방전은 가스종류, 가스압력, 방전갭의 길이 및 과전압(over voltage) 등에 의존한다.

Fig. 1은 방전 전압과 전류의 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 글로우 방전이 발생하는 전류는 수 십 내지 수 백 mA로서 이때 방

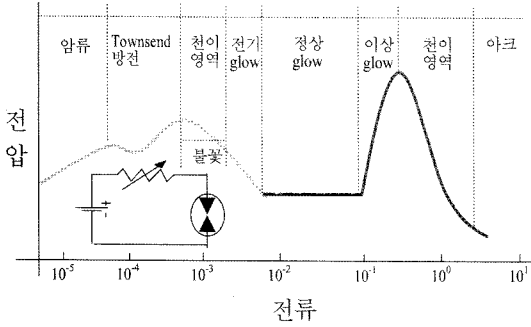


Fig. 1. Voltage and current waveform of glow discharge.

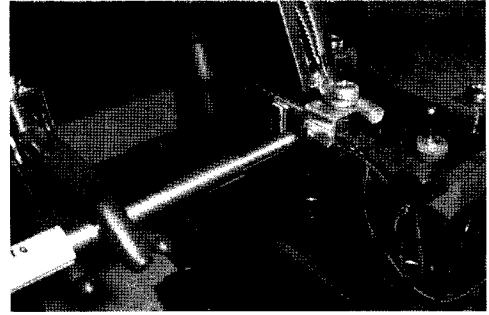


Fig. 3. Experimental view for glow discharge generating.

전압은 일정하게 유지되는 정전압 특성을 가진 자속방전이다.

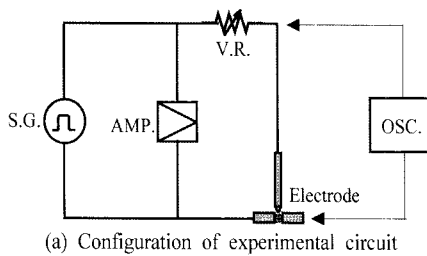
3. 실험장치 구성 및 실험방법

3.1. 실험장치의 구성

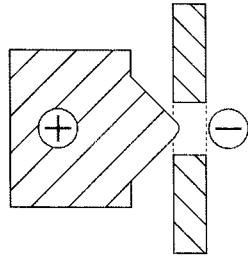
Fig. 2는 대기압 하에서의 글로우 방전을 발생시키는 회로의 구성도 및 전극부의 상세도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 방전전극부의 설치사진이다.

실험에 사용된 장비는 Signal Generator(HP 8116 A), Amplifier(NF HVA4321, 10kV AC/DC), Variable Resistor(20W/10kΩ) 및 Oscilloscope(LeCroy 9354TM) 을 사용하였다.

S.G.에서 발생시킨 주파수를 AMP.에서 전압 및 전류를 증폭시킨 후 전류조정 저항 V.R.을 거쳐 방전을 시키는 양·음극에 공급되도록 하였다. 방전시의 전압 및 전류는 OSC.로 관측 및 기록하였다.



(a) Configuration of experimental circuit



(b) Magnified electrode

Fig. 2. Configuration of experimental circuit and magnified electrode.

3.2. 실험 방법

대기압 글로우 방전을 발생시키기 위하여 양·음극 사이에 인가한 주파수는 60Hz에서 5kHz까지 가변하면서 공급하였으며, 전압은 100V에서 1000V까지를 가변하여 공급하였다. 전류는 최대 50mA까지 공급하였다.

또한, 실험에 사용한 전극의 종류 및 형태는 Table 1 및 Fig. 4와 같다.

Fig. 5는 양극 전극의 형상을 확대한 그림을 나타낸 것이다. 전극 끝부분의 형상에 따라 round, triangle 및 needle의 tip으로 구분하여 제작하였다.

Table 1. Size and shape of electrodes

| 구분 | 전극 재료 | 전극 직경(mm) (내; Tip 모양) | 전극 두께(mm) |
|---------------|------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 극양 | 구리 (Cu) | Φ 10mm(round) | |
| | | Φ 8mm(triangle) | |
| | | Φ 5mm(needle) | |
| | 스테인리스 (St) | Φ 10mm(round) | |
| | | Φ 8mm(triangle) | |
| | 철 (Fe) | Φ 8mm(triangle) | |
| | | Φ 8mm(round) | |
| | | Φ 5mm(needle) | |
| | 몰리브덴 (Mo) | Φ 10mm(round) | |
| | | Φ 8mm(triangle) | |
| | | Φ 6mm(needle) | |
| | 니켈 (Ni) | Φ 10mm(triangle) | |
| Φ 8mm(round) | | | |
| Φ 5mm(needle) | | | |
| 극음 | 구리 (Cu) | Φ0.1, Φ0.2, Φ0.3, Φ0.4, Φ0.5, Φ0.6, Φ0.7, Φ0.8, Φ0.9, Φ1.0 | 0.1t, 0.2t, 0.3t, 0.4t, 0.5t, 0.6t, 0.7t, 0.8t, 0.9t, 1.0t |
| | | 스테인리스 (St) | |
| | 철 (Fe) | Φ0.1, Φ0.2, Φ0.3, Φ0.4, Φ0.5, Φ0.6, Φ0.7, Φ0.8, Φ0.9, Φ1.0 | 0.1t, 0.2t, 0.3t |
| | | 니켈 (Ni) | |

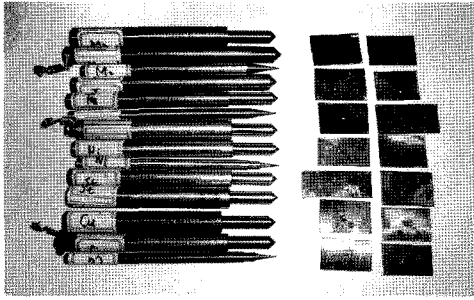


Fig. 4. Photo of electrodes.

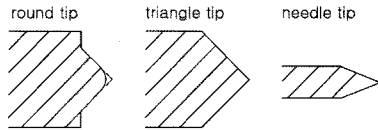


Fig. 5. Magnified positive electrode tip.

round tip은 triangle tip과 같이 전극의 끝 부분을 45°로 한 후 끝 부분의 가장자리를 약간 둥글게 처리한 것이다. needle tip은 전극의 끝 부분을 20°로 하였다. 음극 전극은 판 형태의 재료에 구멍을 낸 것이다.

다양한 양·음전극의 재료 및 형태를 바꾸어 가면서 이들 전극사이에서 전기적인 파라미터(전압, 전류 등)를 가변시키면서 방전의 형태를 일정 시간 동안 관측하였다.

x-y-z 축을 미세하게 조정할 수 있는 테이블 위에서 양·음전극의 거리 및 센터를 미세하게 조정 및 정렬하였다.

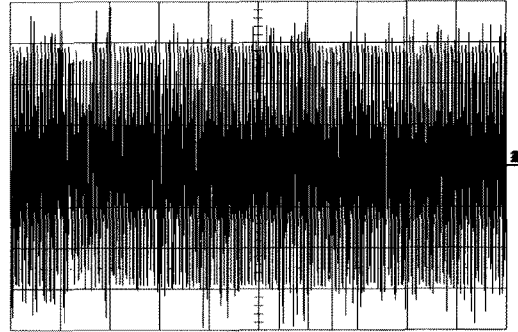
4. 실험결과 및 고찰

4.1. 실험 결과

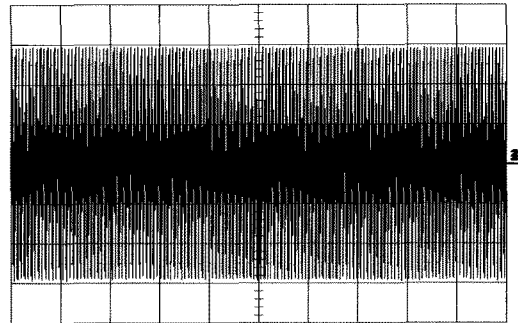
Fig. 6은 방전상태를 모니터링(10s/Div.)한 그래프이다. 전압 및 전류가 아크방전으로 전이되지 않는 상태를 안정한 글로우 방전(Fig. 6(b))으로, 그렇지 않는 경우(Fig. 6(a))를 불안정 글로우 방전으로 판정하였다.

음극에 접근되는 양극의 edge 부분(Fig. 2(b) 참조)이 음극과 균등 간격일 때는 Fig. 6의 (b)와 같은 둥근 형태의 글로우 방전파형을 발생시키나 불균등 간격일 때는 Fig. 6의 (a)와 같이 아크방전으로 전이되는 경향이 강했다.

Table 2는 실험에 사용한 전극의 재료 및 형태 등에 따라 대기압 글로우 방전의 발생을 Fig. 6과 같이 시간의 경과와 더불어 ‘안정’ 및 ‘불안정’의 상태를 관측하여 기록한 것이다.



(a) unstable



(b) stable

Fig. 6. Monitoring oscilloscope trace to decide stable or unstable glow discharge(voltage; 200 V/Div., current; 10 mA/Div., X-axis; 10s/Div.).

양극을 몰리브덴으로 하였을 때가 대체적으로 글로우 방전이 ‘안정’한 상태로 되는 경우가 많게 나타났다. 그러나 동일 양극에서 음극으로 니켈을 사용하였을 때에는 글로우 방전이 불안정하였다.

Fig. 7은 몰리브덴(Mo) 양극(직경 10mm, round tip)과 구리(Cu) 음극(두께 1.0mm, 내경 0.5mm)을 이용하여 인가전원의 주파수에 따른 인가전압, 방전전압 및 방전전류의 파형을 관측한 것이다.

Table 2. Experimental results of stable or unstable glow discharge by electrodes

| electrodes | | positive | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|----------|------|----|-----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|----|----|----|---|
| | | Mo | | | Cu | | | Fe | | | st | | | Ni | | | |
| | | 10φ | 8φ | 6φ | 10φ | 8φ | 5φ | 8φ | 8φ | 5φ | 10φ | 8φ | 10φ | 8φ | 5φ | | |
| negative | Cu | 0.11 | 0.3φ | S | US | US | US | US | S | US | US | S | US | US | US | US | S |
| | | | 1.0φ | S | S | US | US | US | US | S | S | S | S | S | S | S | S |
| | 0.5φ | 1.0φ | S | | | | S | | S | | | | S | S | | | |
| | | 0.5φ | S | | | | US | | US | | | | US | US | | | |
| | 1.0φ | 1.0φ | S | | | | US | | US | | | | US | US | | | |
| | | 1.0φ | S | | | | US | | US | | | | US | US | | | |
| St | 0.11 | 0.3φ | S | | | | S | | S | | | S | S | | | | |
| | | 1.0φ | S | | | | S | | S | | | S | US | | | | |
| Ni | 0.15 | 0.3φ | US | | | | US | | | | | | US | US | | | |
| | | 1.0φ | US | | | | US | | | | | | US | US | | | |

S: stable, US: unstable

인가전원의 주파수가 500Hz에서는 방전전압 및 전류의 파형이 간헐적으로 왜곡되어 나타났다.

여기서 V_s = supply voltage, V_d = discharge voltage, I_d = discharge current 및 f = frequency이다.

Fig. 8은 글로우 방전전압·전류 파형을 나타낸 것이다. 방전전압 및 전류파형은 Fig. 1에서와 같이 전형적인 글로우 방전을 유지하고 있음을 나타내고 있다.

전형적인 글로우 방전이 발생된 실험조건은 양극은 몰리브덴(직경 10mm, round tip)으로, 음극은 구리(두께 1.0mm, 내경 0.1mm)를 사용한 경우였다. 양전극 사이에 인가 주파수는 1kHz, 방전전압은 360V 및 방전전류 12mA일 때이다.

또한, Fig. 9는 Fig. 7의 조건에서 촬영한 방전불꽃을 나타낸 것이다.

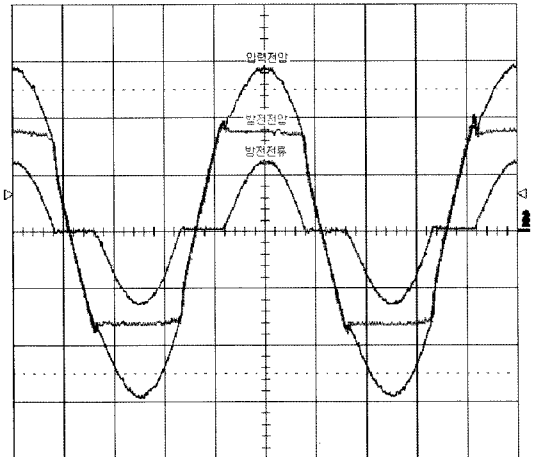


Fig. 8. Traditional waveforms of glow discharge(voltage; 200 V/Div., current; 10mA/Div.).

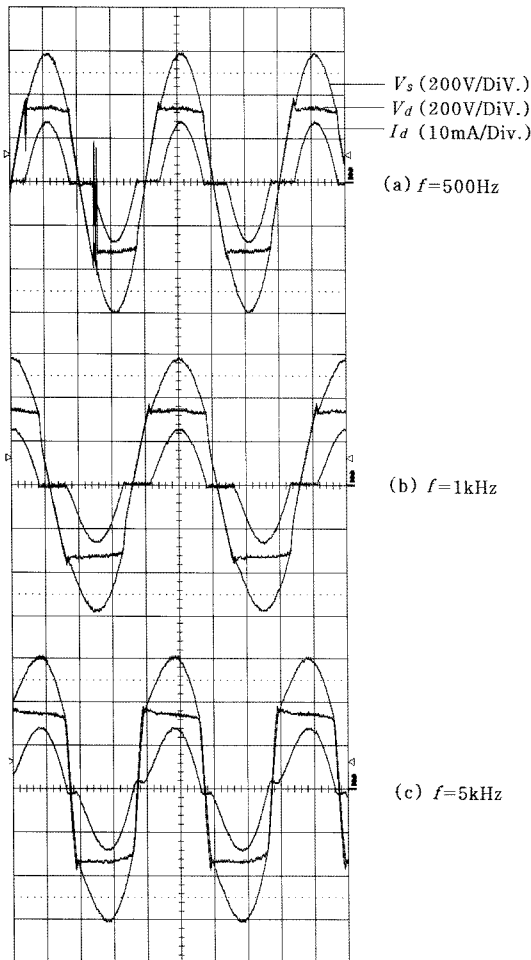


Fig. 7. Observed voltage and current waveforms as a function of frequency.

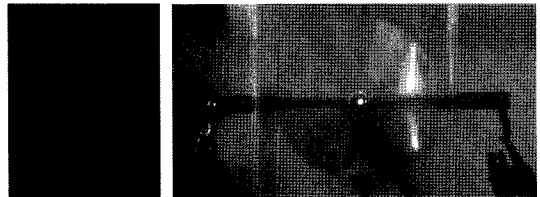


Fig. 9. Photo of during glow discharge.

Fig. 10은 양극은 몰리브덴(Mo)으로 round tip 형태, 음극은 니켈(Ni)로 Φ 0.5mm/t 0.15mm, 양·음전극 사이에 인가 주파수는 1kHz일 때 불안정한 글로우 방전 파형을 나타낸 것이다.

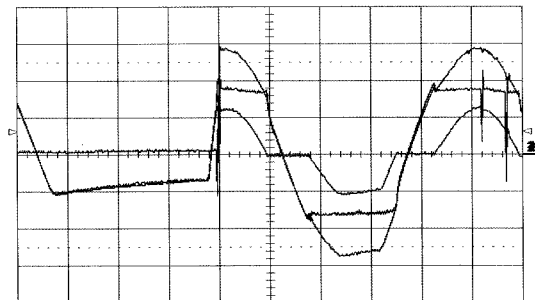


Fig. 10. Unstabled waveforms of glow discharge(voltage; 200 V/Div., current; 10mA/Div.).

4.2. 결과 고찰

최적의 안정화된 글로우 방전을 발생 및 유지하기 위해서는 실험에 사용한 전극의 형상이나 재질이 밀접하게 관여되는 것으로 특히, Table 3과 같이 전극재료의 용융점, 열전도율 등과 상관관계가 있는 것으로 볼 수 있다. 즉, 용융점이 크게 차이

Table 3. Material properties of electrodes^{8,9)}

| 전극 재질 | 비등점 (°C) | 용융점 (°C) | 열전도율 (cal/cm-S-°C) | 열기전력 (mV) | 일함수 (eV) |
|----------|---------------|-------------|-----------------------|--------------|-------------|
| 구리(Cu) | 2310 | 1083 | 0.94 | +0.75 | 4.65 |
| 철(Fe) | 2450 | 1539 | 0.172 | +1.91 | 4.31 |
| 몰리브덴(Mo) | 3700 | 2625 | 0.35 | +1.31 | 4.60 |
| 니켈(Ni) | 2450- 2900 | 1445 | 0.14 | -1.43 | 5.15 |
| 스테인리스 | - | - | - | - | - |

가 나는 전극간의 재료와 열전도율이 좋은 전극에서 글로우 방전이 안정하게 발생하였다.

3가지 양극전극(tip; round, triangle 및 needle)의 형태에 따라 발생하는 글로우 방전의 안정/불안정화를 명확하게 구분하는 것은 곤란하였다.

5. 결론

본 논문에서는 제전기 등에 응용하기 위하여 코로나 방전에 비해 낮은 방전유지전압, 자속방전 및 오존생성이 발생하지 않는 특징을 갖는 글로우 방전을 대기압 하에서 발생시키는 최적의 전극 메커니즘과 안정한 글로우 방전을 지속시키기 위하여 실험을 통해 규명하고자 하였다. 이를 정리해 보면 다음과 같다.

1) 전형적인 글로우 방전전압 및 전류파형을 유지시키는 조건은 양극은 몰리브덴(Mo), 음극은 구리(Cu)를, 인가 주파수는 1kHz, 방전전압은 360V, 방전전류는 12mA이다. 이는 실험에 사용한 전극의 형상이나 재질에 관여되는 것으로 특히, 전극재료의 용융점, 열전도율 등이 밀접하게 관여되는 것으로 나타났다.

2) round, triangle 및 needle의 3가지 양극전극의 tip에 따라 발생하는 글로우 방전의 안정화를 명확

하게 구분하는 것은 곤란하였다. 즉, 글로우 방전의 안정화는 전극의 형태보다는 재질에 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다.

3) 대기압 하에서 글로우 방전 최적 메커니즘의 실험적 규명은 제전기 등에 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 電氣學會放電ヘンドブック出版委員會編, 放電ヘンドブック, pp. 150-152, 1999.
- 2) A. Ohsawa, "Neutralization of Static Charge by an Atmospheric Pressure Glow Discharge", 산업안전보건연구원 한·일공동세미나 발표자료집, pp. 45~51, 2003.
- 3) Satiko Okazaki et al., "Appearance of Stable Glow Discharge in Air, Argon, Oxygen and Nitrogen at Atmospheric Pressure Using at 50 Hz Source", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 26, No. 5, pp. 889~892, 1993.
- 4) Nicolas Cherardi and Francoise Massines, "Mechanisms Controlling the Transition from Glow Silent Discharge to the Streamer Discharge in Nitrogen", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 29, No. 3, pp. 536~544, 2001.
- 5) E. E. Kunhardt, "Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure, Nonequilibrium Plasmas", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 28, No. 1, pp. 189~200, 2000.
- 6) 최상원, 大澤 敦, 이해근, 이관형, "글로우 방전의 메커니즘과 점화위험성의 고찰", 한국안전학회 추계학술발표회 논문집, pp. 397~402, 2004.
- 7) 최상원, 大澤 敦, "방전에너지 제어에 의한 최소점화에너지의 고찰", 한국안전학회지, 제22권, 제1호, pp. 36~39, 2007.
- 8) 전기공학 핸드북 편찬회편, 전기공학 핸드북, 대광서림, p. 349, 1988.
- 9) <http://www.matweb.com>