

Ion Migration Characteristics of a High Voltage Rotary Spark Airgap

文在德[†] · 金泰勳^{*} · 黃德賢^{**}

(Jae-Duk Moon · Tai-Hoon Kim · Deok-hyun Hwang)

Abstract - Ion migration characteristics of a rotary spark airgap of high voltage pulse generator had been investigated. It was considered that the ion migration speed and the ions of the gases(atmosphere gases, O₂, N₂, and H₂O, etc.) and the charged very fine particles(about 10~100nm size) migrated through the upper stator ball and bottom stator ball of the rotary spark airgap would determined the rise and fall times of the output high voltage pulse. In this paper, a basic study on the ion migration characteristics of the rotary spark airgap between the spark stator ball and the ion-sensing electrode of the proposed high voltage pulse generator have been investigated experimentally. As a result, the three kinds of ion speeds were detected by the ion-sensing electrode installed at the position of the bottom stator ball of the ball type sparkgap of the high voltage pulse generator. The migration velocities, diameters, masses, charges, numbers of the ions and particles were obtained by experiments and calculations, which, however, would determine the rise and fall times of the output high voltage pulse.

Key Words : Pulse Generator, Ball Type Sparkgap, Rotating Airhole, Ion Migration, Rise and Fall Time, Ion-Sensing Electrode.

1. 서 론

펄스 고전압 전원 기술은 낮은 전력밀도로 순시 고전압을 얻을 수 있고, 전로파괴로의 방전도 피할 수 있으며, 펄스폭을 조절함으로써 에너지효율을 높일 수 있어서 입자제거용 전기집진장치의 전원으로 사용되어 왔다[1-2]. 최근에는 분위기 가스 분자들(atmosphere gases, O₂, N₂, and H₂O, etc.)을 가열시키지 않고 전자(electron)만을 선택적으로 가속시킴으로써 높은 에너지효율을 얻을 수 있는 이점이 있어서, 전기집진장치는 물론 유해가스 제거용 비열 방전 플라즈마 장치의 전원으로도 많이 적용되고 있는 실정이다[3-8].

회전 스파크 갭형(rotary spark gap type) 고전압 펄스 발생장치(high voltage pulse generator)는 급준 펄스(fast rise pulse)를 용이하게 얻을 수 있고, 제작과 가격은 저렴하기 때문에 고전압 펄스 전원으로 많이 연구되고 또 적용되고 있다[9-16].

회전 스파크 갭형 펄스발생장치의 회전 금속구형 스파크 갭(ball type spark gap) 대신에 회전 공극(airhole type spark gap) 구조가 제안되고, 그 특성상 펄스발생장치의 구조가 더욱 간단해 질뿐만 아니라 고전압 출력 펄스 특성도 향상되어서, 회전 스파크 갭형(rotary spark gap type) 고전압 펄스 발생장치(high voltage pulse generator)는 더욱 유용하게 적용될 수 있다[17]. 이와 같은 회전 스파크 갭형의 펄스 상승 및 하강시간(pulse rise and fall time)은 고정 스

파크 갭간의 이온 이동 시간에 의해 결정되게 되나[1, 2], 이와 같은 부분의 연구 결과는 많이 발표되어 있지 않다.

본 연구에서는 회전 공극형 펄스발생장치의 방전 공극간(sparking airgap)의 출력 펄스의 상승시간(rise time)과 하강시간(fall time)에 크게 영향을 미치는 이동 이온들의 이동 특성을 방전 공극상의 검지전극의 구조를 변수로 하여 실험적으로 조사 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림1은 본 실험에 사용한 고전압 펄스발생장치와 인가전원 회로의 개략도이다. 인가 전원은 교류 승압부, 직류 전압 정류부, 고전압충전부, 고전압 측정부로 구성되어 있다. 교류 승압부는 교류전원을 고전압으로 승압(220V:40kV/40mA)하였고, 직류 정류기(20kV, 2A)와 충전커패시터(2.5nF/20kV)를 사용하여, 직류 고전압(20kV/20mA)을 얻게 하였고, 회로의 시정수를 고려하여 충전저항(R1, 10kΩ/160W)과 방전저항(R2, 100kΩ/160W)를 사용하였다. 고전압 펄스 발생장치는 상단의 고정 방전구, 하단의 고정 검지전극, 그리고, 회전 공극을 갖는 회전원판으로 구성되어 있다.

그림 2는 펄스 발생부의 회전 공극(rotating airhole)을 갖는 회전원판의 사진을 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 회전원판(bakelite, t=5.0mm, d_{eff}=65mm, diam 100mm)으로 CNC와 CAD/ CAM을 이용하여 제작하였다. 회전원판상의 공극의 직경(diameter of airgap, D_A)은 고정 금속구의 직경(diameter of stator, D_S)와 그리고 검지 전극의 직경(outer diameter of ion-sensing electrode, L_S)이 모두 동일하게 15.0mm로 고정하였다. 회전 공극은 회전 금속구와 동일한 위치에 회전 금속구 대신에 2개조의 회전 공극(rotating airhole)을 회전 절연판상에 개설했다. 고정 금속구는 전이 소모(great and fine wander)가 적은 니켈(Ni)이 도금된 황

[†] 교신저자, 正會員 : 慶北大 工大 電子電氣工學科 教授 工博
E-mail : jdmooon@knu.ac.kr

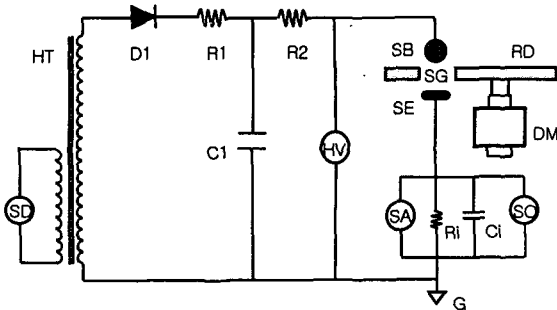
^{*} 學生會員 : 慶北大 工大 電氣工學科 碩士課程

^{**} 學生會員 : 慶北大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2005年 7月 25日

最終完了 : 2005年 8月 11日

동구(brass ball, 15mm diameter)을 사용하였다. 방전구간 간격(discharge gap spacing, S_A)는 출력전압과 부분방전을 생성하지 않는 범위를 고려하여



- C1: HV capacitor
- R1,R2: HV resistor
- D1: HV diode
- RD: rotating disk
- HT: HV transformer
- SG: Spark gap
- SE: Sensing electrode
- Ri: shunt resistor
- DM: dc motor
- SA: surge arrester
- SO: storage oscilloscope
- HV: HV Probe
- Ci: shunt capacitor

그림 1 실험장치 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

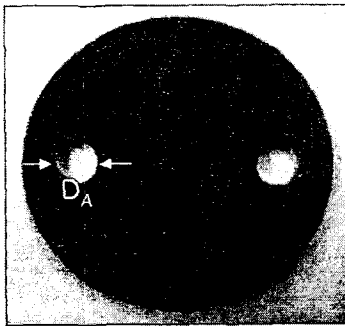
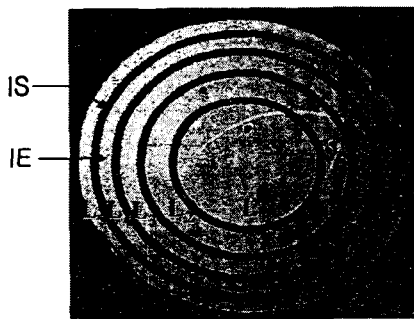


그림 2. 회전원판의 사진
Fig. 2. Photograph of the rotating disk.



IS: interelectrode insulation spacing,
IE, L_{1-5} : ion-sensing electrode,

그림 3. 이온전류 검지전극의 사진
Fig. 3. Photograph of the ion-sensing electrode.

표 1 이온전류 검지전극 규격.

Table 1 Specification of the ion-sensing electrode.

Symbol	Electrode Diameter		W [mm]
	D_i [mm]	D_o [mm]	
L_1	0.00	6.70	3.35
L_2	7.70	9.48	0.89
L_3	10.48	11.78	0.65
L_4	12.78	13.42	0.32
L_5	14.42	15.00	0.29

$D_A > S_A$ 되게 $S_A=10.5\text{mm}$ 로 고정하였다. 이때 회전공판의 두께 (thickness of rotating disk, S_R)는 5.0mm이며, 하단부의 간격은 상부와 동일하게 설정하였다. 회전 절연판의 회전수는 직류 모터를 사용하여 3600rpm으로 고정하였으며, 회전수는 회전수 측정기(tacometer, Shimpo EE-2)를 사용하여 측정하였다. 모든 펄스급전선은 고전압 동축선($Z=50\Omega$)을 사용하였다. 출력 고전압과 출력 펄스파형은 고주파 고전압 프로브(HV probe, 1000:1, Tektronix P6139A)와 측정 정밀저항($R_i=10.000k\Omega$)과 측정형 오실로스코프(Tektronix TDS 3032B, TDS 3034B)로 측정하였다.

그림3은 방전 간격(spark gap)중의 이동하는 이온을 검지하기 위해 사용된 검지 전극의 사진이다. 이 이온 검지 전극은 상하단의 고정 금속구중 하단 금속구 위치에 설치하였다. 이 검지 전극의 형상은 그림 3과 같이 절연 원판상에 환상(ring type)의 금속전극(ion-sensing electrode, brass)의 면적을 5등분으로 분할하고, 이 5개의 이온 검지 전극(ion-sensing ring electrode, L_{1-5})에 각각 5개의 정밀저항($R_i=10.000k\Omega$)을 연결하여 접지하였다. 이 접지된 정밀저항에는 고주파 제거용 콘덴서(mylar, $C_i=100\text{pF}$)와 보호소자(surge arrester, SA, $V_a=230\text{V}$)가 병렬로 연결되어 있다. 이 정밀저항 양단에 측정형 오실로스코프(Tektronix, 3034B 4ch, 3032B 2ch, storage type)를 연결하여 상하단의 고정 금속구간의 방전시 상단 고정 금속구로부터 하단의 검지 전극으로 이동하는 이온 전류를 펄스 파형으로 검지하였다. 검지된 각각의 이온 전류 펄스 파형은 오실로스코프에 측정하여 각각 검출하였다.

모든 실험장치 및 측정장치는 철재 금속통속에 설치하여 외부로부터의 전자파 노이즈를 차폐하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 4는 상부 고정 금속구에 정극성(positive polarity) 고전압을 인가하여 방전 갭간에 방전이 발생한 경우의 각각의 검지 전극($L_1 \sim L_5$)에 출력된 펄스파형을 나타낸 것이다. 회전 공격형 스파크갭의 상하 전극간(고정 금속구와 검지 전극간)에 회전 공격이 도통(expose)되게 회전해 오는 경우, 아크방전이 발생되고, 따라서, 방전시 생성된 방전 이온의 이동이 일어나게 된다.

이 때 검지 전극의 순서(외측으로부터 내부로 방향)에 따라 상하의 고정 전극간이 회전 공격으로 열리게 되어 이온이 회전 공격간을 이동하게 되고, 접지저항에 전류가 흘러 출력파형이 오실로스코프상에 전압(또는 전류)가 관측되게 된다.

$$\Delta A = idt = vdt/R \text{-----(1)}$$

$$\Delta Q = idt \text{-----(2)}$$

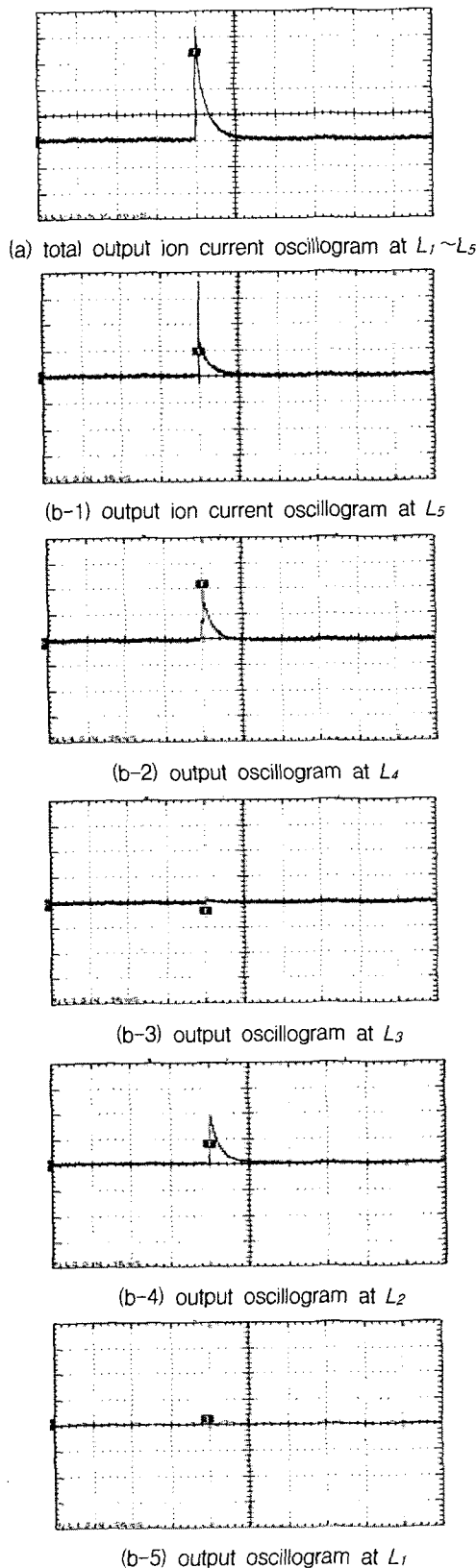


그림 4. 정극성 방전시의 각각의 검지 전극의 출력 펄스 파형 특성 [Vert: 5V/div, Horz: 50ns/div]
 Fig. 4. Oscillograms of positive output pulse waveforms of the ion-sensing electrode.

이때의 축적형 오실로스코프상의 펄스 면적(ΔA)은 식 (1)과 같이 오실로스코프 화면상에 나타난 입력 저항(input impedance, R) 양단의 전류의 시간적 적분 값이다. 이 값을 오실로스코프의 입력저항 값인 R 로 나눈 값($\Delta A/R=idt$)이 곧 방전 공격간을 이동해 온 방전 전하량($\Delta Q=idt$)을 나타내게 되고, 그림 3의 5개의 검지 전극으로 이동되어 온 전하량을 순차적으로 구할 수 있게 된다.

상측 금속구에 정극성을 인가하여 본 실험의 스파크 공격의 방전에 의한 발생된 오실로스코프상의 출력 펄스 파형을 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)는 모든 검지 전극($L_1 \sim L_5$)을 합해서 측정된 전체 펄스 전압 파형이다. 그림 4(b-1)~(b-5)는 회전 공격이 이온 검지 전극상에 도통되게 회전해 오는 순서별, 즉, $L_5 \sim L_1$ 별로 나타낸 것이다. 먼저, 회전 공판이 처음 도통하게 되는 L_5 의 경우, 아-크방전이 여기서 시작되고, 따라서 방전시 생성된 이온의 이동이 처음 일어나게 되는데, 이 검지 전극의 폭($W=0.29\text{mm}$)이 매우 짧기 때문에 이 전극을 통과하는 시간은 공격 회전원판의 속도가 3,600rpm의 경우 0.3ms정도이다. 따라서 이 L_5 에서 검지되는 전하는 그림 4(b-1)에서 나타나는 것 같이 이동 속도가 매우 빠른 이온들(electron and very light charged gas ions)일 것으로 사료된다. 그 다음 부터는 즉, 그림 4(b-2)에서 나타나는 것 같이 무거운 이온들이나 하전된 매우 작은 입자들(charged very fine particles)이 주로 이동될 것으로 사료된다.

다음은 그림 4(b-3)에서 나타나는 것 같이 무거운 이온들이 이동하고 나면 건조 공기중에는 더 이상의 이동할 이온들이 거의 없기 때문에 이온들의 이동은 없게 되고, 오실로스코프상에는 더 이상의 출력파형이 나타나지 않게 된다. 그런데, 예상 외에 그림 4(b-4)에서 나타나는 것 같이 제3의 새로운 출력 파형이 오실로스코프상에 나타나게 되는데, 이들은 대단히 무거운 이온들로서 이온들에게 하전된 중량 입자들(charged heavy particles)이라고 사료된다. 그 다음은 그림 4(b-5)에서 나타나는 것 같이 더 이상의 출력 파형이 나타나지 않게 되어 상하의 두 고정전극간의 방전이 종료되게 된다.

그림 5는 상부 고정 금속구에 부극성(negative polarity) 고전압을 인가하여 고정 전극간에 방전이 아-크 방전이 발생한 경우의 각각의 검지 선전극($L_1 \sim L_5$)에 출력된 펄스파형을 나타낸 것으로, 기본적으로는 그림 4의 정극성 파형의 경우와 극성만 틀리며 유사하였다.

회전판의 회전에 의한 출력 펄스파형을 그림 5(a)는 모든 검지 전극($L_1 \sim L_5$)을 합해서 측정한 전체 전압 출력 파형이다. 그림 4(b-1)~(b-5)는 각각 회전 공격이 도통되게 회전해 오는 순서별로 나타낸 것이다. 회전 공판이 처음 도통하게 되는 L_5 의 경우, 아-크방전이 여기서부터 시작되어 전극간에 이온의 이동이 처음 일어나게 되는데, 이 검지 전극의 폭이 매우 짧기 때문에 그림 5(b-1)에서 나타나는 것 같이 이동 속도가 매우 빠른 이온들(주로 electron and very light charged gas ions)이 이동될 것으로 사료된다.

그 다음 부터는 무거운 이온들, 즉, 그림 5(b-2)에서 나타나는 것 같이 주로 가벼운 하전 입자들(charged very fine particles)이 이동될 것이다. 다음은 그림 5(b-3)에서 나타나는 것 같이 무거운 이온들이 이동하고 나면 더 이상의 이동할 이온들이 거의 없기 때문에 이온들의 이동은 없게 되고, 오실로스코프상에는 더 이상의 출력파형이 나타나지 않게 된다. 그런데, 그림 5(b-4)에서 나타나는 것 같이 새로운 출력 파형이 오실로스코프상에 나타나게 되는데, 이들은 대단히 무거운 이온들로서 전극간의 아-크 방전시에 하전된 무

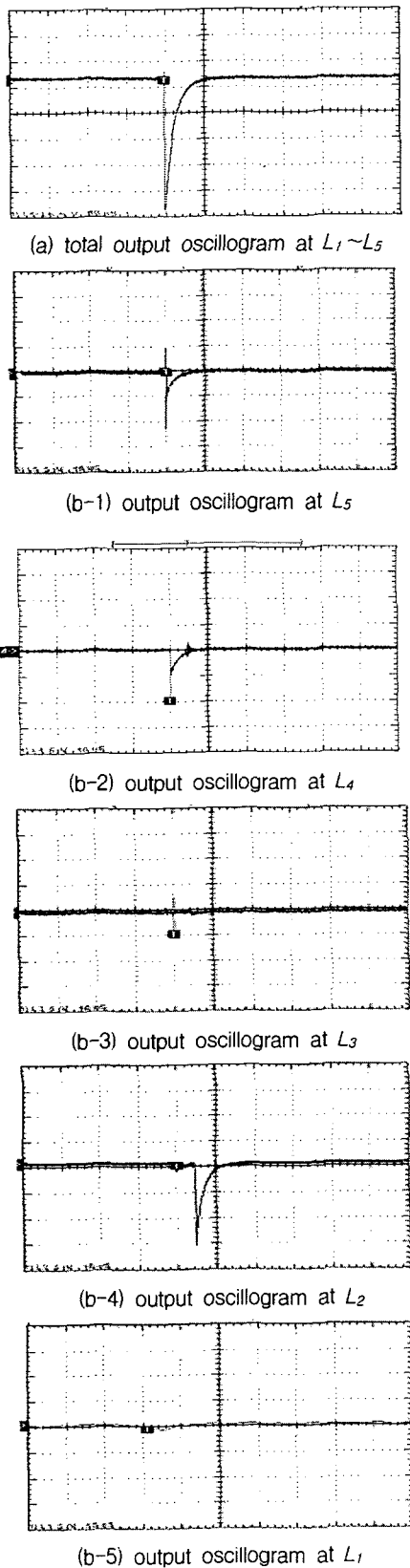


그림 5. 부극성 방전시의 각각의 검지 전극의 출력 펄스 파형 특성. [Vert: 5V/div, Horz: 50ns/div]
 Fig. 5. Oscilloscopes of negative output pulse waveforms of the ion-sensing electrode.

거운 입자들(charged heavy particles)이라고 사료된다. 그 다음은 그림 4(b-5)에서 나타나는 것 같이 더 이상의 출력 파형이 나타나지 않게 되어 고정 금속 전극간의 방전이 종료되게 된다.

이상의 실험상 주어진 값들과 실험 결과로부터 얻은 결론부터 이동되는 이온 전하량(migrated charge, Q), 이동되어 온 입자의 수(particle number, N), 이들 입자들의 중심 반경(number-median radius, a)과 질량(particle mass, m), 이동 속도(migration velocity, v_M)등을 계산하여 알 수 있다. 만일, 이온 및 입자들이 한 개의 전자의 전하 ($q=1.6 \times 10^{-19}C$)로만 하전되어 있다고 한다면[8], 그림 4, 5에서의 그림 4와 5상의 펄스 면적(ΔA), 즉, 식 (1), (2)에서 구한 전체 전하량(Q)과 총 입자 수(N)는 식 (3)과 같고, Q 에서 Nq 을 구할 수 있게 되며, 이들의 결과를 도식화한 것이 그림 6이다. 방전 공격간의 전계속에서 하전된 입자들이 정전력(Coulomb force)에 의해 이동될 때의 이 입자의 정전 에너지(electrostatic energy)는 모두 운동 에너지(kinetic energy)로 변환되므로, 이는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있고, 여기서 v_M 과 t_d 는 각각 이동 입자의 속도와 이동하는데 소요된 시간이다. 식 (4)에서 질량 m 이 구해지면, 식 (6)로부터 입자의 부피, V_p 를 알 수 있다. V_p 를 알면, 식 (7)으로부터 이동하는 입자의 반경 a 도 알 수 있게 된다[1-2, 4].

$$Q = qN_p \text{ -----(3)}$$

$$mv^2/2 = S_{iq}E \text{ -----(4)}$$

$$v_M = S_B/t_d \text{ -----(5)}$$

$$d_p = m_p/V_p \text{ -----(6)}$$

$$V_p = 4\pi a^3/3 \text{ -----(7)}$$

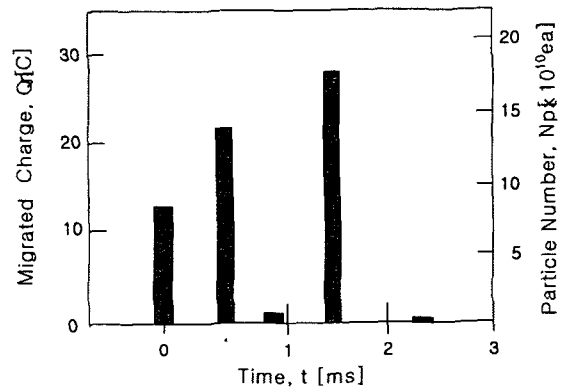


그림 6 시간에 따른 이온전하량과 이동 입자수 특성
 Fig. 6. Migrated charges and particles vs time.

그림 7은 각각의 입자들이 나타난 시간과 전하 및 입자 수를 같이 나타낸 것이다. 즉, 그림 1에서, 고정금속구와 검지전극 사이를 회전원판이 회전하여 회전원판상의 회전 공격(rotating airhole)에서 고정금속구에서 검지 전극이 보이기 시작할 때를 기준점($t=0ms$)으로 하고, 고정 금속구에서 검지 전극의 중심점 쪽으로 이동하여 가는 시간(delayed

time, t_e)을 나타낸다. 이들은 공격을 갖는 회전 원판의 회전 수(3,600rpm), 공격의 직경($D_A=15.0\text{mm}$), 검지전극의 폭(표 1 참조)과 검지전극간의 절연전극 간격(폭 1.0mm, 표 1 및 그림 3 참조)을 계산하여 얻을 수 있다. 따라서, 그림 1에서,

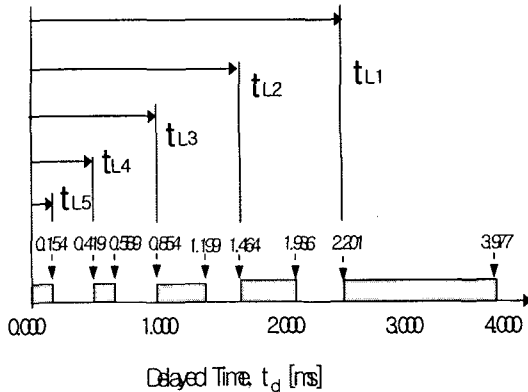


그림 7 검지전극상의 이온 도달 시간 분포도
 Fig. 7 Time distributions of the ion migration on the ion-sensing electrode.

고정금속구와 검지 전극 사이를 회전원판이 회전하여 회전 원판상의 회전 공격을 통해 고정 금속구에서 검지 전극이 보이기 시작하는 이 기준점($t=0\text{ms}$)에서 방전이 시작되는 점이고, 또, t_d 는 기준점($t=0\text{ms}$)에서 방전이 개시되고 난 직후 순차적으로 각각의 검지 전극상에 이온이 이동되어 와서 오실로스코프상에 출력 펄스가 나타나게 되고, 이 순차적 지연 시간(delayed time, t_d)에 따라 각각 나타낸 것이 그림 7로서, 횡축(x axis)에는 각각의 검지전극 이동 시간(exposed time)과 검지전극간의 방전 공격을 통과하는 이온 도달 시간 분포도를 나타낸 것이다.

표 2. 회전 공격의 각 실험 결과 규격
 Table 2. Data of rotating spark airgap.

Symbol	t_E [ms]	t_W [μs]	t_d [ms]	Q [nC]	$N_{P_{10}}$ [$\times 10^{10}$ EA]	v_M [m/s]	a [nm]
L ₁	1.78	-	2.20	0.0	0.0	-	-
L ₂	0.47	2	1.46	27.0	16.9	7	19.0
L ₃	0.34	1	0.85	0.1	0.3	12	13.0
L ₄	0.17	1.5	0.42	22.5	14.1	24	8.0
L ₅	0.15	2	0.00	13.0	8.1	5k	0.24

표 2는 이상과 같은 수식들과 본 실험 결과로부터 계산하여 얻은 값들이다. 여기서 t_W 는 그림 4, 5의 출력 펄스의 펄스폭(pulse width of the oscillogram)이다. 표 2에서 보는 바와 같이, 회전 절연판이 회전하여 회전원판상의 공격이 상측 고정 금속구와 하측 검지 전극간을 도통되게 되면 초기 방전이 개시되고, 방전이 개시되면, 분위기중의 가스가 이온화되고, 이들 이온들이 상하측간의 전계를 따라 정부로 각각 이동하게 된다. 이때 일부 이온들은 분위기중의 입자들에게 부착되어 하전하게 되고, 이들 하전 입자들도 전계에 따라

각각 이동하게 된다. 이때 이들의 이동 속도는 입자 하전량, 전계, 그리고 질량에 따라 결정되고, 따라서 출력 펄스는 그림 4, 5에서와 같이 스펙트럼(spectrum)을 갖게 된다. 이때 제1차 이동하는 매우 가벼운 이온들(very light charged gas ions)의 추정 직경은 약 0.5nm로서 분위기 기체의 직경이고, 제2차의 매우 작은 입자의 경우는 직경이 약 16nm로서 분자 집합체(very fine particles, molecule clusters)의 크기이며, 또, 제3차의 매우 무거운 이온들(charged heavy particles, 또는 charged water vapours)의 직경은 약 40nm로 추정 되었다 [4, 5].

이상과 같은 이온들의 이동 속도와 이동 순서는 그대로 펄스 고전압의 출력 펄스의 상승시간(rise time)과 하강시간(fall time)을 결정하게 된다. 즉, 초기의 빠른 이온들은 펄스 상승 시간을 결정하고, 후기의 이동 속도가 느린 이온들은 펄스 하강 시간을 결정하게 될 것이다. 따라서, 이들 이동 입자의 크기와 이동속도 특성을 개선하기 위해 분위기 가스의 종류, 조성, 압력, 그리고 전기 물성등을 구체적으로 결정함으로써 출력 펄스의 특성을 개선할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 회전 금속구형 펄스발생장치의 스파크캡의 하단 고정 금속구 대신에 원형의 다섯 개의 검지 전극을 순차적으로 설치함으로써 방전 공격간(spark airgap)의 방전에 의해 생성된 이온들의 이동특성을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

정극성 및 부극성의 고전압을 고정 방전구간에 인가하여 금속구 간격간에 방전이 발생한 경우, 상하 고정 금속구 전극간에 회전 공격(rotating airhole)이 와서 상하 금속구간이 도통되게 되면 아-크 방전이 발생되고, 검지 전극의 순서(외측으로부터 내부로 방향)에 따라 출력파형이 순차적으로 스펙트럼이 관측되었다. 이때의 축적형 오실로스코프상의 출력 펄스 파형의 특성으로부터 이온 전하량, 이동 시간, 이동 입자수, 입자의 질량, 입자 직경까지를 계산하여 얻을 수 있었다. 회전 공격이 검지 선전극상에 회전해 와서 도통되고 방전이 발생되면, 방전시 생성된 이온의 이동이 일어났고, 정 및 부극성이 동일한 출력 펄스발생 특성을 가졌다. 이때 이동 속도가 매우 빠른 이온들(중심 직경이 0.5nm 정도의 가스 이온들로 추정)이 먼저 하부 검지 전극에 검지되었다. 그 다음에는 가벼운 하전 입자들(중심 직경이 16nm 정도의 분자 집합체로 추정)이 검지되었으며, 마지막으로 무거운 이온들(중심 직경이 40nm인 미세 입자 또는 수증기 입자들로 추정)이 검지되는 것으로 추측되었다.

본 실험 결과, 이온들의 이동 속도와 이동 순서는 펄스 고전압의 출력 펄스 특성에 영향을 줄 수 있음을 보여 주었다. 따라서, 이들 이동 입자의 크기와 이동속도 특성을 개선한다면 출력 펄스의 특성도 개선할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] S. T. Pai and Qi Zhang : Introduction to High Power Pulse Technology, World Scientific, 1~45 (1995).

[2] 하이파워-테크놀로지연구회編 : 파ルス파워-工學의 基礎と應用, 近代科學社, 52~98 (1998년도).

[3] Massimo Rea and Keping Yan : Evaluation of Puls Voltage Generator, IEEE. Trans on IA, 31, 3 (1995)

[4] K. Yan, Corona Plasma Generation, Eindhoven (2001).

[5] W. Wang, Z. Zhao, F. Lie and S. Wang, Study of NO/NOx removal from flue gas contained fly ash and water vapor by pulsed corona discharge, Journal of Electrostatics, 63 (2005) 155-164.

[6] B. M. Penetrante, and S. E. Schultheis, Non-thermal plasma techniques for pollution control, Spring-Verlag, Berlin Heidelberg, NATO ASI series 34, A&G (1993).

[7] G. Sathiamoorthy, S. Kalyana, W. C. Finney, R. J. Clark, B. R. Locke, Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NOx removal in a pulsed streamer corona discharge reactor, Indersterial. Engineering Chemistry Res. 38 (5) (1999) 1944-1855.

[8] 新版靜電氣ハンドブック, 日本靜電氣學會 (1998)

[9] A. Mizuno, K. Shimizu, A. Chakrabarti, S. Furuta, NOx Removal Process Using Pulsed Discharge Plasma, IEEE Trans. on IA, 31, 5, (1995) 957~962.

[10] M. M. Kekez : Simple sub-50ps rise-time high voltage generator, Rev. Sci. Instrum. 62(12) (1991) 2923~2930.

[11] X. Xu and S. Jayaram: Generation of Steep Front Short Duration Impulse from Conventional Standard Impulse Generator-A Simulation Study, IEEE Trans on IA (1995) 1390-1394.

[12] 박승록, 정석환, 김진규, 문재덕, Marx 펄스발생기를 응용한 소형 고전압 급준 펄스발생장치, 대한전기학회지, 50, 2, (2001) 72-78.

[13] M. J. Rhee and B. N. Ding, Repetitive square pulse generation by inductive pulse-forming lines with a field-effect transistor as an opening switch, Review of Science Instrumentation. 64 (6) (1993) 1665~1666.

[14] R. M. Ness, B. D. Smith and E. Y. Chu etc, Compact, Megavolt, Rep-Rated Marx Generators, IEEE Trans. on ED. 38, 4, (1991) 803~809.

[15] S. L. Moran and L. W. Hardesty, High-Repetition-Rate Hydrogen Spark Gap, IEEE Trans. on ED 38, 4, (1991) 726~730.

[16] J. R. Woodworth, R. G. Adams and C. A. Frost : UV-Laser Triggering of 2.8-Megavolt Gas Switches, IEEE Trans. on PS, PS-10, 4, (1982) 257-26.1.

[17] 문재덕, 이종훈, 이복희, 회전공극형 고전압 펄스발생장치, 대한전기학회, 논문지, 53C, 5 (2004) 1~45.

저 자 소 개



문재덕 (文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 사대 과학교육과(물리전공) 졸업. 1975년 동대학원 전자공학과 졸업(공석). 1982년 일본 동경대학 대학원 전기공학전문과정(공박). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 교수.

Tel : 053-950-5601

Fax : 053-950-5508

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr



김태훈 (金泰勳)

1979년 6월 23일생. 2005년 상주대 공대 전자전기공학부 졸업. 현재 경북대학교 대학원 전기공학과 재학중(석사과정).

Tel : 053-940-8601

Fax : 053-950-5508

E-mail : k6t2h3@naver.com



황덕현 (黃德賢)

1978년 6월 30일생. 2002년 금오공대 제어계측과 졸업. 현재 경북대학교 대학원 전기공학과 재학중(석사과정).

Tel : 053-940-8601

Fax : 053-950-5508

E-mail : besthdh@hanmail.net