

電解液內에서 無聲放電의 電氣的特性에 關한 研究

(A Study on Electrical Characteristics of the Silent Discharge in an Electrolyte.)

李 鍾 憲* 河 泓 坤**

(Lee, Jong Hun and Ha, Hong Gon)

要 約

本 論文은 Na_2CO_3 電解液內에서 無聲放電의 電氣의 特性을 測定하기 위한 方法을 充放電回路로 구성된 等價回路로써 제안하였다.

電氣의 等價回路에는 Zener Diode와 Capacitor를 使用하였고 電氣의 特性은 oscilloscope 상에 電壓 電荷間의 위상이 간단한 平行四邊形으로 나타난다.

이 平行四邊形의 面積이 매 주기당 방전 수행시의 Energy이며 이것은 인가한 電壓의 波形에 무관하고 인가한 電壓의 最大值에 關係한다.

Abstract

In this paper, an analogical method for measuring the electrical characteristics of the silent discharge in the Na_2CO_3 electrolyte is proposed by using an electrical equivalent model which consist of charging and discharging circuits.

The electrical equivalent model is constructed with the use of zener diode and capacitor, and the electrical characteristics can be obtained by the voltage and charge traces which appear a simple parallelogram on the oscilloscope. The area enclosed by the parallelogram could be considered of the energy input per cycle, and is independent of the applied voltage waveform but dependent on the maximum applied voltage.

1. 序 論

電解液內에서의 放電現象은 電解液의 순간적인 絕緣 破壞에 依해서 發生한다⁵⁾. 絕緣固體의 放電現象에 關한 電氣의 特性은 部分放電의 檢出로^{14, 18, 19)} 等價回路化하였고, Zener Diode, Neon Lamp, SCR, thyatron 등을 使用한 回路化가 實現되었다^{6, 10)}.

그러나 電解液內에서 放電은 電極의 加熱速度가 빠

르고, 溫度를 同一 溶液內에서 任意로 調整할 수 있기 때문에 放電加工에 많이 利用되고 있지만, 電解液의 ion粒子 및 電子運動에 對한 potential^{11, 13)}, 외부電界의 인가시 Energy受授關係, 熱의問題, 電解液 誘電率의 異常分散等^{13, 22)} 물리적인 諸條件때문에 그 이론들이 통일되지 못하였고, 또한 電解液의 化學적인 作用도 問題視된다. 그러나 전해액내에서의 순간적인 絕緣 破壞의 原因으로는^{11, 20, 22)}

* 正會員, 東亞大學校 工科大學 電子工學科
Dept. of Electronics Engineering, Dong-A Univ.

** 正會員, 東義工業專門學校電子科
Dept. of Electronics Engineering, Dong-A Junior College

接受日字: 1977年 8月 18日

1) 電子와 正리 ion에 依한 파괴

2) 열에 依한 파괴

3) 전해액의 分子振動에 依한 파괴

等으로 放電이 發生한다고 생각할 수 있으며 외부電界의 영향도 받게 된다⁷⁾.

本論文에서는 이상과 같은 여러가지 성질을 고려하여 電解液은 絶緣固體와 液體에 比해서 도전성이 높고 저전류, 저전압에서도 放電의 發生이 可能하다. 그리고 電解液內에서의 放電의 電氣的인 特性을 絶緣固體와 液體의 理論을 도입하여서 그 類似性을 實現했으며 電解液의 放電特性을 Double Zener Diode를 利用하여 實現하였다.

2. 理論

電解液內에 電極을 넣고, 여기에 交流電壓을 인가하면, 電源電壓의 상승에 依해서 電極間의 電壓이 放電開始電壓에 達하면 放電이 일어나고, 電界에 依해서 電子 ion等이 加速되어서 電解液分子와의 衝突電離가 능격적으로 발생하여 電極의 放電表面에 堆積된다. 그리고 電極間의 電壓이 방전소멸전압에 達하면 放電은 靜止한다. 이 放電時間은 아주 짧지만, 放電電流은 impulse로 된다. 다시 電源電壓의 上昇으로 電極間의 電壓이 放電開始電壓에 達하면 電流은 impulse로 반복하게 되고 ion들은 電極의 放電表面에 電荷를 供給하며, 이 表面에서는 電荷의 累積을 制限하는 逆起電力(逆電界)을 形成하게 된다¹⁹⁾. 이러한 cut-off는 印加한 電壓이 電解電極間에서 극성이 反對로 될 때까지 그리고 電解液內의 反對電荷들이 放電表面에 堆積되기 까지 放電이 持續된다. 電解液의 放電에 對應시키기 위해서 다음과 같은 等價回路를 도입하여 생각한다.

, 10, 14, 18)

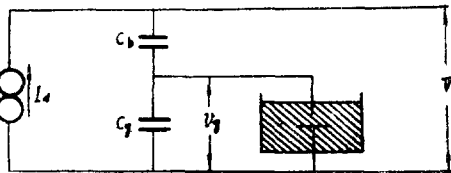


그림 1. 等價 impedance 計算用 無聲放電 回路(連續放電)

Fig.1. Silent discharge circuit for calculation of equivalent impedance(continuous discharge)

그림 1은 電解液內에서 連續無聲放電時의 等價回路이다. 그림 1에서 C_g 는 電極을 포함한 방전기구의 용량이고 C_b 는 電解液의 순간적인 靜電容量이며 C_g 는 방전기구와 並列로, 그리고 C_b 는 直列로 접속되었다고 가정한다. 이 等價回路는 Mole에 依해서 定量的으로 解析하므로써¹⁴⁾ 放電의 크기를 量的으로 表示할 수 있었다. 먼저 非放電時를 생각하면 이때는 放電機構가 閉放되므로 C_g 와 C_b 는 直列로 되고, 이때의 容量 C 는

$$C = \frac{C_g \cdot C_b}{C_g + C_b} \tag{1}$$

가 된다. 放電時는 電解電極間의 電壓은 放電持續電壓 V_g 로 유지된다. 이때 電流 I_d , 端子間 電壓을 V 라 하면

$$V = V_g + \int_0^t \left(\frac{I_d}{C_b} \right) dt + (V_{I=0} - V_g) \tag{2}$$

로 되므로 위式을 微分하면

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I_d}{C_b} \tag{3}$$

가 된다. 卽 放電時는 放電機構가 短絡되어서 容量은 C_b 이다. 이 放電機構에 關한 放電의 電氣的 特性의 檢出回路가 그림 2이다. 여기에 交流電壓을 印加할 때는 2個의 動作領域이 存在한다. 卽 非放電時는 C_g 와 C_b 는 直列로 되며 이때의 放電은 off이다.

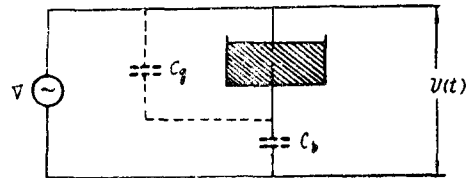


그림 2. 無聲放電의 電氣的 特性의 檢出回路

Fig.2. Circuit for detecting electrical characteristics of silent discharge.

放電時는 電解液內의 靜電容量은 C_b 이며, 이것은 電解電極間의 電流를 제어하는데 중요한 役割을 한다. 放電을 遂行하는데 중요한 parameter는 이 C_b 이며 電解電極間의 損失이 放電을 遂行하는데 필요한 Energy이다. 每週期當 Energy W 는 다음과 같이 表示된다. ⁴⁾

$$W = \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt = \int_0^T v(t) dq(t) \tag{4}$$

여기서 $i(t)$ 는 放電電流이다. 이 그림 2의 電壓 $v(t)$ -電荷 $q(t)$ 의 位相圖는 理想的인 경우 平行四邊形이 되며, 回路理論에 依해서 그림 3의 기울기들이 C_b 와 C_g 로 決定된다. 卽 放電時는 그림 3의 ①과 ②의 直線이고, 그 기울기는 $\frac{1}{C_b}$ 이다. 그리고 非放電時는 ③과 ④의 直線이고 기울기는 $\frac{C_g + C_b}{C_g \cdot C_b}$ 이다. 이 기울기들을 利用하여 平行四邊形의 各邊의 直線式을 구하면(但 여기서 a 點의 電壓을 v_{max} 라 한다.

①의 方程式은

$$v(t) = \frac{q(t)}{C_b} + e_f \tag{5}$$

②의 方程式은

$$v(t) = \frac{q(t)}{C_b} - e_f \tag{6}$$

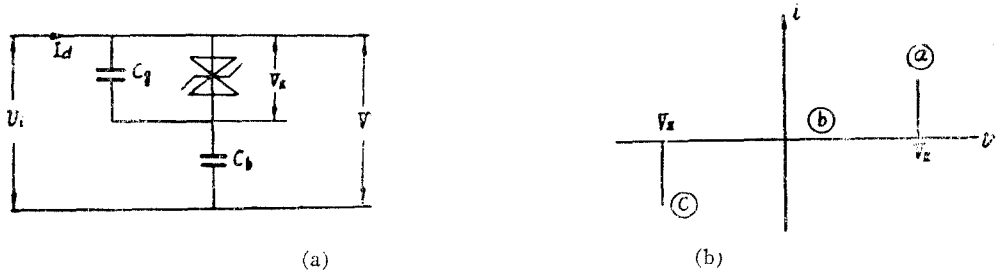


그림 4. (a) 無聲放電의 電氣回路
 (b) Double Zener Diode의 電壓 電流 特性
 Fig. 4. (a) Electrical circuit for the silent discharge and
 (b) A voltage-current characteristics of the Double Zener Diode

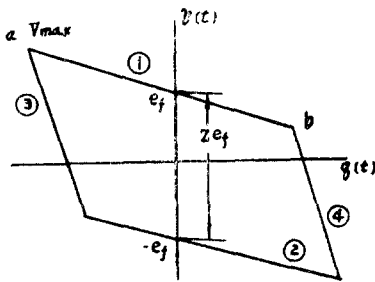


그림 3. 交流無聲放電時 電荷-電壓의 電氣的特性
 Fig. 3. Charge-voltage characteristics for AC silent-discharge

그리고 3의 方程式은

$$v(t) = \left(\frac{C_g + C_b}{C_g \cdot C_b} \right) q(t) - \frac{1}{C_g} \{ C_b \cdot v_{max} - e_f (C_b + C_g) \} \quad (7)$$

4의 方程式은

$$v(t) = \left(\frac{C_g + C_b}{C_g \cdot C_b} \right) q(t) + \frac{1}{C_g} \{ C_b v_{max} - e_f (C_b + C_g) \} \quad (8)$$

放電 Cut-in 電壓 卽 그림 3의 b點의 電壓은 方程式 (5)와 (8)에서

$$v_b = -v_{max} + 2e_f \left(\frac{C_g + C_b}{C_b} \right) \quad (9)$$

가 된다. 그림 3에서 放電 ON의 領域이 電壓 $2e_f$ 로 분리된다. 여기서 e_f 는 放電時 電解電極間에 걸리는 一定한 電壓강하이다. 放電은 a點에서 電壓이 最大로되며, 이 點에서 放電은 off狀態로 移行한다. 그리고 $v(t)$ 는 두 直列容量 C_g 와 C_b 에 依해서 制限을 받는다. 放電은 臨界點 b에서 시작하여서 주기적으로 반복한다.

이 位相圖는 기하학적으로 이상적인 平行四邊形의 面積이 放電 Energy이다. 이 面積은 方程式 (5), (6), (7) (8)의 積分式, 또는 행렬式에 의해서

$$W = 4e_f C^b \left\{ v_{max} - e_f \left(\frac{C_b + C_g}{C_b} \right) \right\} \text{ (Watt/Cycle)} \quad (10)$$

그리고 放電時 필요한 電力은 $P = fW = W/T$ 의 關係에서

$$P = 4fe_f C_b \left\{ v_{max} - e_f \left(\frac{C_g + C_b}{C_b} \right) \right\} \text{ (Watt)} \quad (11)$$

그러나 方程式 (10) 또는 (11)은 e_f 와 C_b 로 決定되지만 물리, 화학적인 條件에 依해서 이 값들이 순간적으로 變하기 때문에 因數 $(C_b + C_g)/C_b$ 을 임의로 變化시킬 수 없다.

上記와 같은 電解液內에서의 無聲放電時의 電氣의 特性을 電氣回路의 으로 解析한다. 無聲放電의 電氣의 特性을 再現 시킬 수 있는 電氣의 回路의 構成이 그림 4이다. 그림 4-(a)의 回路은 그림 1의 電解電極을 double Zener Diode로 代置하였다. Zener Diode는 부저항영역을 가지지 않으며, 어떤 臨界 逆電壓에 도달하면 電流가 급격히 增加하는 Zener항복을 가지므로 그림 4-(a)와 같이 접속하면 그림 4-(b)와 같은 電壓電流의 特性을 얻는다^{10,12)} 卽 이러한 對稱인 Zener항복 $\pm V_z$ 때문에 인가한 正弦波의 peak가 clipper 되며¹⁵⁾ 동특성 Impedance를 무시할 수 있게 된다. $q(t) = 0$ 일때 C_b 의 電壓이 0임으로 $v_i = V_z$ 이고 이것이 電解液內의 電極間의 電壓강하 e_f 에 대응한다. 그림 4-(a)의 動作은 그림 4-(b)에서 보인 ㉔, ㉕, ㉖의 3領域으로 구분할 수 있다.

卽

i) $i_z > 0$ 일때 ㉔의 領域에서 動作하고, 이때 Zener Diode電壓 v 는 $v = V_z$ 임으로 出力 V 는

$$V = V_z + \int_0^t \left(\frac{Id}{C_b} \right) dt + (V_i - V_z)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{Id}{C_b}$$

뒷 式은 方程式 (2)와 (3)이며 그림 3의 位相圖에서 ㉔의 기울기가 $1/C_b$ 이다.

ii) $i_z = 0$ 일때는 ㉕의 領域에서 動作하고 $-V_z < v < V_z$ 임으로

로 이때 Double Zener Diode는 開放狀態로 되어서 C_b 와 C_a 는 直列로 動作하며 그림 3의 ㉓과 ㉔의 積션의 기술기를 決定한다.

iii) $i_z < 0$ 일때 ㉔의 領域에서 動作하고 Double Zener Diode電壓 v 는 $v = -V_z$ 이며 그림 3의 ㉔의 기술기가 $1/C_b$ 로 됨을 알수 있다.

3. 實驗方法

電解液內의 無聲放電時 電氣의 特性의 檢出回路가 그림 5이며 그 電氣的 回路의 Model이 그림 6이다.

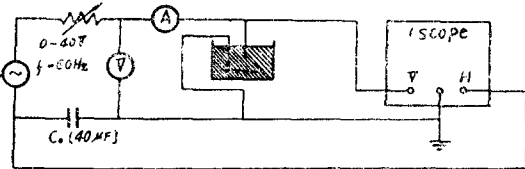


그림 5. 전해액내에서 무성방전의 전기적인 특성의 검출회로

Fig. 5. Experimental circuit for silent discharge in electrolyte

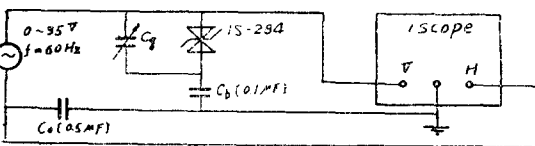


그림 6. 방전無電의 電氣的特性的 回路化

Fig. 6. Electrical circuit model for silent discharge characterization

그림 5에서 가변저항은 Arc放電으로 移行할 때 과도 전류를 제어하기 위한 안전저항이며 Condenser C_0 는 容量이 $40\mu F$, 이 Condenser에 축적되는 電荷를 osilloscope의 수평축에 供給하기 위한 것이다. 電極은 市販하는 놋쇠이고, 對圓形平面(半徑 1.5cm)으로 되어있으며 電極의 間격을 調整할 수 있게 하였다. 電解液은 전극의 부식을 可能한 한 적게하고 無聲放電의 電氣의 特性을 얻는데 比較的 안정한 탄산나트륨(Na_2CO_3) 10%의 溶液을 使用하였다. 그리고 외부인가전원은 周波數가 60Hz이며 最大值를 Slidac로 제어하여 入力端에 正弦波를 0~140V까지 供給하였다. 그리고 出力端의 電壓을 osilloscope의 수직축에 供給하였다. 그림 6은 2個의 Zener Diode (IS-284 $V_z = 39.6V$)을 逆方向으로

접속하였다. C_0 는 $0.5\mu F$, 電解液의 靜電容量에 대응하는 C_b 의 容量이 $0.1\mu F$ 이다. 그리고 平行四邊形의 기술기를 考察하기 위해서 C_g 값을 가변시켰으며 입력 電壓은 周波數 60Hz, 最大值를 0~35V까지 供給하였다.

4. 結果 및 考察

電解液內에서의 放電現象은 電解液의 순간적인 絶緣의 破壞임으로 無聲放電은 電壓印加와 거의 同時에 發生한다고 볼 수 있다. 電壓印加時 印加電壓에 依한 電解電極間의 電壓은 電解液內의 도전성 粒子들의 運動과 電解液의 電離作用等으로 많이 저하 되어 印加電壓에 比해서 매우 낮다(그림 7 참조)

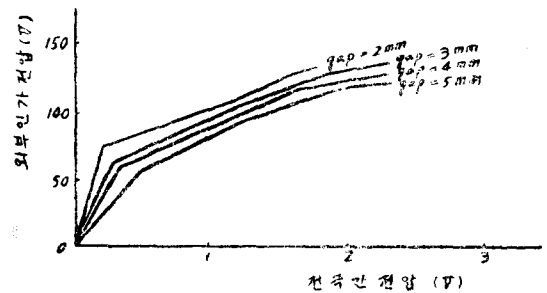


그림 7. 외부인가전압에 전극간 전압
Fig. 7. Applied voltage v.s. gap voltage

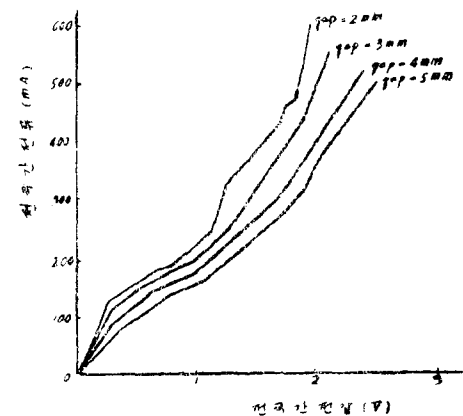
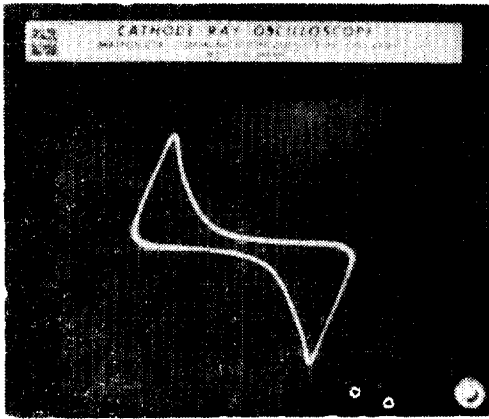
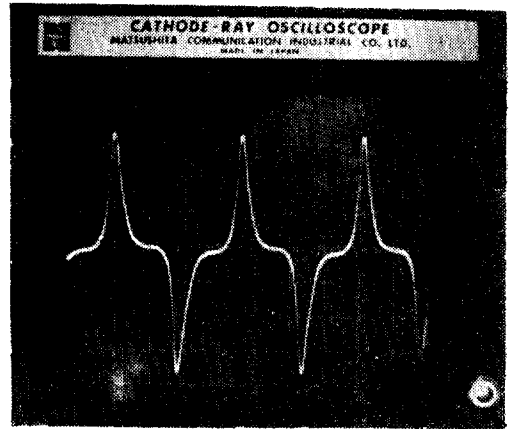


그림 8. 電極間電壓對電流
Fig. 8. Gap voltage v.s. gap current.

전극간의 間격이 좁을수록 Arc放電의 移行이 빠르며, Arc放電으로 移行하면 過渡電流가 흐르지만 無聲放電의 領域內에서는 電解液에서 많은 電力이 소모되



(a)



(b)

그림 9. (a) Gap=3mm일때 Arc放電時 位相圖(수직축, 전압, 수평축, 전하 $V=1\text{volt/cm}$)
(b) Gap=3mm일때 Arc放電時 電流波形($V=1\text{Volt/cm}$, $H=1\text{m sec/cm}$)

Fig. 9. (a) Electrical characteristics (Vaxis:voltage, Haxis: charge) and
(b) The current waveform for Arc discharge ($V=1\text{Volt/cm}$ $H=1\text{m sec/cm}$) when
gap=3mm

여 電流는 미소하며 이 전극간 電壓에 對한 전극간 電流의 關係가 그림 8이다. 電極間的 間격이 좁을수록 印加電壓에 依한 電解液內的 電子 및 ion들의 運動 分子들의 電離作用이 활발해져서 電力이 크다. Arc放電으로 移行하면 급격한 過渡電流(7~10A)로 放電이 지속되지만 溶液의 飛散, 電極의 加熱, 수소 gas의 發生 등으로 그 特性을 檢査하는데 적합하지 않다. 이러한 放電의 領域에서 電氣의 特性은 그림 9-(a)이며, 이때의 電流波形이 그림 9-(b)이다. 이 電流波形에서 알 수 있는 것처럼 放電이 ON狀態에서 OFF狀態로 되는 時間이 無聲放電의 時間(그림 12-(b) 참조)에 比해서 길

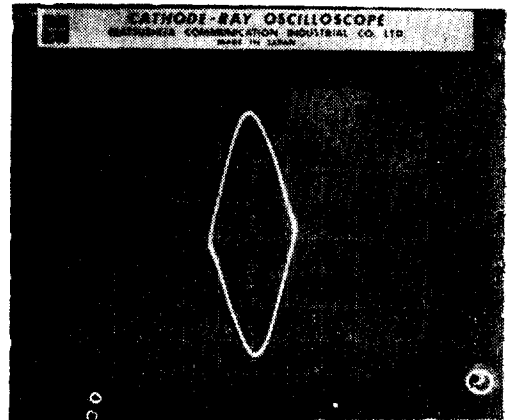


그림 11. Gap=1mm일때 무성방전의 전기적 특성(수직 전압, 수평 전하 $V=0.03\text{ volt/cm}$)

Fig. 11. Electrical characteristics for silent when gap=1mm (Vaxis: Voltage Haxis: Charge)

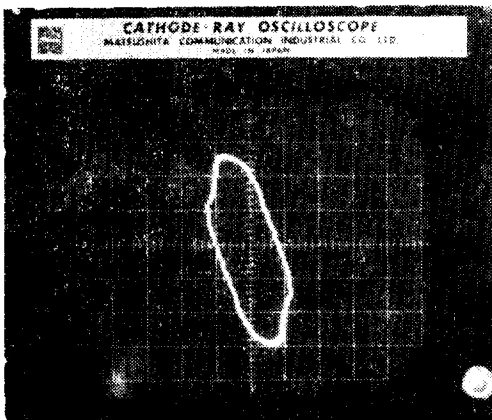
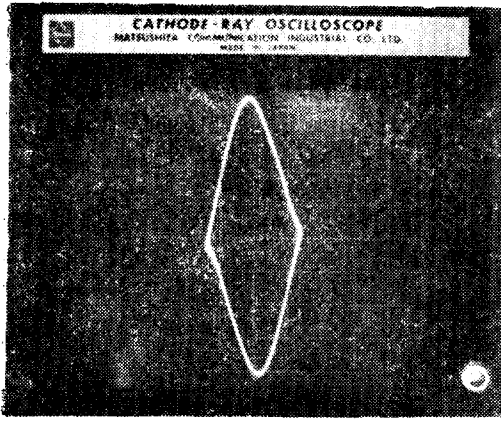


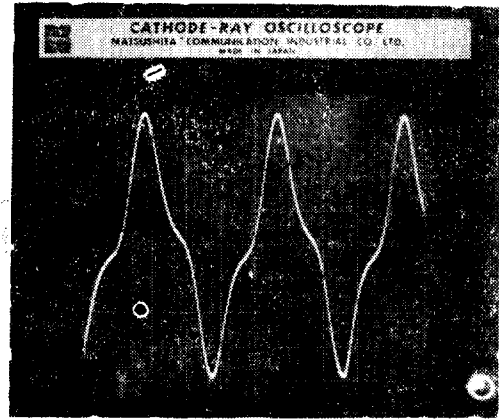
그림 10. Gap=1mm일 때 放電圖形 ($V=3\text{Volt/cm}$)
Fig. 10. Discharge figure when gap=1mm ($V=3\text{Volt/cm}$)

며, 또한 電壓의 순간적인 增加로 인해서⁹⁾ 그림 9-(a)와 같은 電壓-電荷間的 位相圖로 되었다.

無聲放電의 領域內에서 電放圖形은 그림 10과 같으며, 씨그러질이 存在하는 순간이 무성방전의 領域으로 이것은 상당히 대칭적이며 거의 靜止狀態이다. 그림 11은 間격이 1mm일때 그림 12-(a)는 間격이 3mm일 때 전기적 특성이며, 間격의 변화에 依한 平行四邊形의 기울기와 ϵ_f 의 변화를 알 수 있다. 그리고 그림 12-(b)는 間격이 3mm일 때의 電流波形이다. 그림 11, 12-



(a)



(b)

그림 12. (a) Gap=3mm일때 전기적 특성(수직 전압, 수평 전하 $V=0.03Vt/cm$)
(b) Gap=3mm일때 電流波形($V=0.03V/cm$ $H=1m$ sec/cm)

Fig. 12. (a) Electrical characteristics Vaxis: Voltage Haxis:charge) and
(b) Current-waveform for silent discharge ($V=0.03$ Volt/cm, $H= 1m$ sec/cm)

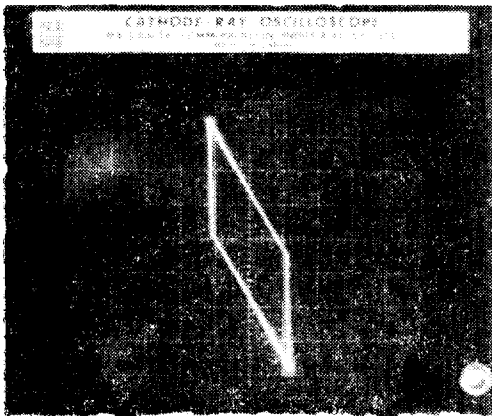


그림 13. $C_g=0$ 일때 Model回路에서 電氣의 特性
(수직축 電壓, 수평축 · 電荷 $V=0.3V/cm$)

Fig. 13. Electrical characteristics of model Circuit(Vaxis:Voltage, Haxis: Charge
 $V=0.3V/cm$)

(a)에서 平行四邊形의 各 모서리는 그림 12-(b)의 電流波形에서 알 수 있는 것처럼 OFF에서 ON狀態의 移行에의 時間的인 차때문에 완만하게 되었다. 그리고 方程式(11)은 放電電力의 法則¹⁹⁾

$$P = kfV^n$$

에 대응하며 여기서 f 는 周波數 K 는 比例常數 그리고 n 는 電極系의 構造 및 電解液의 種類, 濃度等에 依해서 決定된다. 그리고 方程式 (10)에서 c_g, e_j 의 增加는 放電 Energy의 감소를 의미하지만 電解電極間의 電壓印加에 依한 比誘電率의 變化, 물과 Na_2CO_3 의 化

學作用, 放電領域內에서의 電子와 ion들의 運動等에서 구명할 問題이다. 實際로 放電 ON領域에서 $1/C_0$ 의 기울기를 갖는 直線이 되겠지만 OFF領域의 지속시간 (9.6m sec)이 ON領域의 지속시간(7.2m sec)에 比較건므로 電源 電壓의 歪曲에도 영향을 받는다¹⁰⁾

電氣的 回路化에서 C_g 의 容量의 變化에 依한 放電 OFF狀態의 기울기의 變化를 調査하였다. 그림 13에서 $C_g=0$ 일 때 放電 OFF의 기울기 $(C_g+C_0)/C_g \cdot C_0$ 의 關係에서 무한대로 되므로 事實상 電解液의 放電에서 불가능한 경우이다. 그림 14-(a)는 $C_g=0.5147\mu F$ 일 때 電氣的 特性으로 이것이 平行四邊形의 기울기를 決定하는데 중요한 因數임을 알 수 있으며, 이 平行四邊形의 面積이 放電 Energy가 됨으로 方程式(10)에 依해서 구할 수 있다. 그림 14-(b)는 電流波形으로 만약 電源 電壓으로 正현파 구형파 그리고 삼각파와 같은 同一한 最大值 V_m 의 값을 인가할 때 方程式(10)에 依해서 平行四邊形의 面積을 이것으로 제어할 수 있다¹⁰⁾

5. 結 論

本 論文에서는 電解液內에서의 無聲放電時의 電氣的 特性을 測定할 수 있게 하기 위해서 電氣回路化하는 方法을 構想하고 이것의 等價回路를 提示했다. 위의 等價回路를 前연 고체와 액체에서의 等價回路와 比較 考察하여 ^{6,10)} 전해액내에서의 無聲放電의 電氣的 特性을 定量的으로 論할 수 있는 바탕을 마련하였다. 即 電解電極間의 용량과 전해액의 순간적인 정전용량이 一定值로 유지되면 電壓의 最大值 V_m 으로 放電進行時의

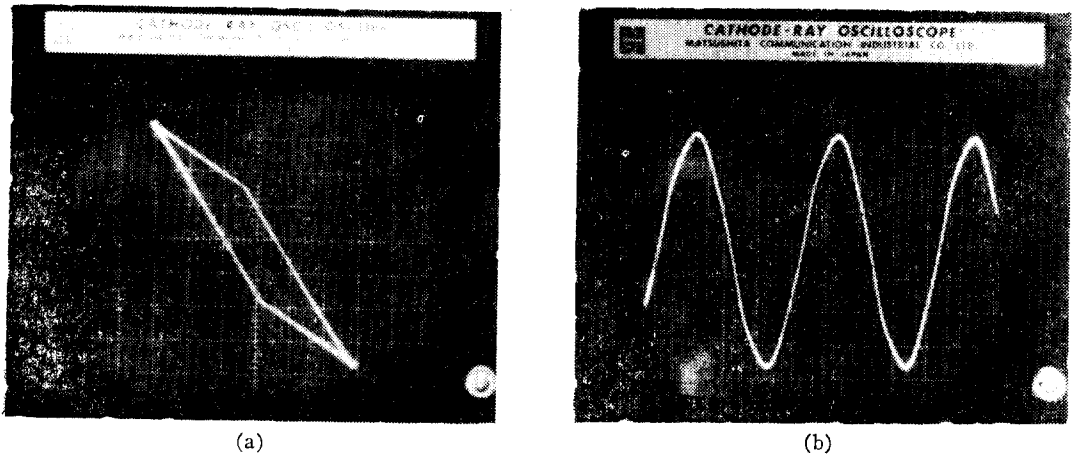


그림 14. (a) $C_g=0.5147\mu\text{F}$ 일때 Model회路的 電氣의 特性(수직축 : 電壓, 수평축 : 電荷 $V=0.3\text{Volt/cm}$)
 (b) $C_g=0.5147\mu\text{F}$ 일때 Model회路的 電流波形($V=0.3\text{Volt/cm}$, $H=1\text{m sec/cm}$)

Fig. 14. (a) Electrical characteristics (Vaxis: Voltage, Haxis: Charge ($V=0.3\text{Volt/cm}$) and
 (b) Current-Waveform for model circuit ($V=0.3\text{Volt/cm}$, $H=1\text{m scc/cm}$) when
 $C_g=0.5147\mu\text{F}$

Energy를 제어 할수가 있으며 간단한 電氣回路化로써 放電時의 Energy의 계산이 可能하다.

參考文獻

1. 李 炳赫 “유전체박막의 방전공공에 關한 연구” 새물리 Vol.13. No.1 pp.21~25, 1970
2. 李 炳赫 “유전체박막의 表面狀態와 공공도의 關係” 새물리 Vol.3. No.2 pp.24~29, 1963
3. 李 炳赫 “Stability of the Micro-spark channel” 새물리 Vol.6, No.1. pp.4~12, 1966
4. 李 炳赫 “유전체의 방전공공에 關한 解析의인 考察 새물리 Vol.4 No.1 pp.65~69 1964
5. 최 종락 “전해질용액에서 放電現象” 새물리 Vol.10 No. 1pp.1~6, 1970.
6. 田如則一, 八木重典 方形波 電流源에 의한 “無聲放電의 電氣의 特性” 日本 電氣學論誌 Vol.95, No.5, pp.249~254 1974
7. A.M. Robinson “Effect of Capacitance on Gain in a Transversely pulsed CO_2 Discharge, Canadian Journal of physics 50 pp.2138~2148, 1972
8. H. Feibus “Corona in Solide insulation systems” IEEE Vol.EI-5 No.3 pp.38~45, 1970
9. J.F. Hughes, A.W. Bright B. Makin, L. Parker “Electrical characterization of Corona discharge for surface Treatment” IEEE Vol. IA11 No.3 pp. 328~335(1975)
11. Arnold Sommerfeld “Thermodynamics and Statistical Mechanics” Academic 3rd, ed pp.92~120 1971
12. Budak “passive and active Network analyisics and Synthesis” Hughton Ist. ed. pp.265~282, 1974
13. Henry Eyring etal “Statistical Mechanics and Dynamics” Wily. Ist. ed. pp.201~414, 1964
14. Kuffel Adbullah “High-Voltage Engineering” pergamon press Ist. ed. pp.90~328, 1975
15. L. Strauss “Wave generation and shaping,” Mc Graw-Hill Ist. ed.pp.33~57, 1960
16. Millmann and Halkias “Integrated Electronics” Mc Graw-Hill Ist. ed. pp.73~77, 1927
17. Robert Lee Ramely physical Electronics” Wads worth publishing company Ist. ed. pp. 228~255 1961
18. 岡田亨 內藤克彦 譯 “部分放電檢出” 코로나社 初版 pp.19~182, 1968
19. 電氣加工學會關西支部編 “放電加工의 理論과 技術” 養賢堂 1版 pp.127~133, 1972
20. 電氣學會 “放電現象”, 五味賢, (日本) 23版 pp. 159~168, 1960
21. 竹谷謙一 “半導體工學”, 日刊工業新聞社 5版 pp. 115~118, 1967 (日本)
22. 島山四男 外 4 “改訂 高電壓工學” 코로나社 21版 pp.144~160, 1972 (日本)