

# 安定 Townsend 放電에 대한 混入가스의 影響

論 文  
30~5~3

## Influence of Intermixed Gas on Stable Townsend Discharge

河 聖 哲\*  
(Sung-Chul Ha)

### Abstract

The Townsend discharge domain is generally observed with stable positive characteristics in  $N_2$  gas discharge at low pressures differently in the others, which transfer immediately to glow discharge after self-sustaining discharge starts.

In this paper, the presence of the stable Townsend discharge, applied voltage-discharge current characteristics and the effect of disigned electrode surface on stable Townsend discharge are studied experimentally in  $N_2$  gas mixed with 0.05% of No in volume.

As the result of this experiment, the stable Townsend discharge is observed only in pure nitrogen with the value of  $pd \geq 8$  [torr·cm] ( $p$ =gas pressure,  $d$ =gap spacing), but not in gas mixtures. This is considered that No gas in gas mixtures disexcites effectively the metastable state of nitrogen.

### 1. 序 論

한 쌍의 니켈電極間에 氣體를 封入하고 電壓을 印加시키면 暗流가 흐른다. 電壓을 漸次 상승시키면 自續放電으로 移行되는데 Townsend 放電은 최초로 나타나는 自續放電이고 放電 電流密度는 대략  $10^{-6}$  [A/cm<sup>2</sup>] 이하의 미약한 放電이다. 自續 후는 보통 負特性을 갖고 不安定하여 즉시 安定되고 전류밀도가 큰 glow 放電으로 進전된다. 그러나 경우에 따라서는 正特性의 Townsend 放電도 存在한다. 正特性을 갖는 Townsend 放電은 回路條件에 관계없이 存在하므로 安定 Townsend 放電이라 本 研究에서는 부르기로 한다. 安定 Townsend 放電은 현재 筆者가 아는 範圍에서  $N_2$  가스中  $pd > 8$  [Torr·cm] 領域, 脫가스 電極에서만 觀測되고 다른 가스 예를 들면 Ar, Ne 中에서는 觀測이 않되는 것으로 알고 있다.<sup>1)</sup>

Townsend 放電은 대단히 미약하지만 絶연기체의 絶연과피의 前段階를 解明하는데 있어서는 可할 수 없는 것이요 또 氣體 이온中에서 電子의 作用을 研究하는데 있어 매우 重要하므로 電氣工學 또는 放電物理 面에서

Townsend 放電 研究의 意義는 크다고 하겠다.

安定 Townsend 放電은 glow 放電으로 移行되지 않고 전류밀도도 glow 放電 보다 대단히 억제되어 있는 것으로 보아 自續後의 放電電流 增加를 阻止시키는 機構를 생각할 필요가 있다고 생각된다.

$N_2$  가스中의 Townsend 放電은 같은 형상, 같은 재료의 電極 일지라도 電極表面을 酸化 또는 脫가스 하므로써 그 存在가 左右된다. 이것은 Townsend 放電의 存在條件이 氣中의  $\alpha$  (第 1 次 電離係數) 作用이 아니고 陰極表面에서  $\gamma$  (第 2 次 電離係數) 作用에 있다는 것을 暗示하고 있다.  $\gamma$  作用에는 複合성이 있고 正이온에 의한 것 ( $\gamma_1$ ), 빛에 의한 것 ( $\gamma_2$ ), 準安定分子에 의한 것 ( $\gamma_m$ ) 이 있다.  $N_2$  가스 中에서는 陰極에서 電子放出을 충분히 할 수 있는 에너지를 갖인 準安定狀態 ( $A^3 \Sigma_u^+$ ) 約 6.2 [eV]의 分子가 있고 또한 비교적 수명이 긴 것으로 미루워 보아 이 準安定狀態의 分子에 의한  $\gamma_m$  作用이  $N_2$  가스 中의 放電特性에 큰 影響을 미치고 있다고 생각된다.

A 狀態의 準安定粒子에 의한  $\gamma_m$  係數는 電極表面 狀態에 따라서 크게 달라지고 脫가스 電極에서는 크고, 酸化電極에서는 적다. 즉 電極表面 狀態에 따라서 陰極에서 的 電子放出의 效率을 크게 變化시킬 수가 有

\* 正會員 : 大林工業專門大學 電氣科 教授  
接受日字 : 1981年 5月 6日

다.

한편  $N_2$  가스 中에 미량인 0.05%의 NO 가스를 混入시키기만 하여도 이 A 상태의 分子가 氣中에서 효율 좋게 脫勵起된다는 報告<sup>2)3)4)</sup>가 있는데 단일 脫勵起시키면 이  $\gamma$ 作用은 상당히 억제되는 것이 분명하며 따라서 電極을 安定 Townsend 放電이 존재하는 脫가스 電極으로 하고 氣中에서 A 상태를 NO 가스로 脫勵起시키면 陰極에서의  $\gamma$ 作用이 低下되어 安定 Townsend 放電이 消失되는 것이 생각된다. 따라서 本 研究는  $N_2$  가스 中에 0.05%의 NO 가스를 混入하여 安定 Townsend 放電의 有無, 電壓電流特性, NO 가스 混入에 의한 脫가스, 電極表面에 대한 影響등에 대하여 實驗으로 研究하였다.

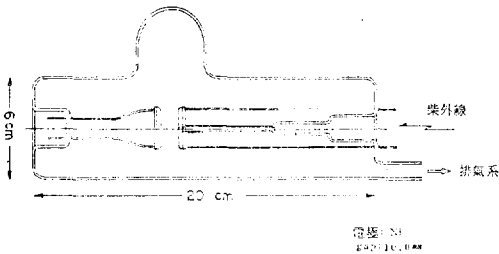


그림 1. 放電管  
Fig. 1. Discharge Tube

2. 實驗裝置 및 方法

實驗에 사용한 放電管의 개형을 그림 1에 表示한다. 管壁의 材質은 파이렉스 유리이고 同一 形狀의 放電管을 2개 사용하였다. 2개의 電極管은 表面狀態만이 다르다. 脫가스 電極은  $10^{-6}$ (Torr)의 眞空속에서 약  $600^{\circ}C$ 로 10時間 이상 高주파 加熱하여 충분히 脫가스한 것이다.

다른 酸化電極은 약  $130$ (Torr)의 산소가스 中에서 高주파 加열에 의하여 약  $600^{\circ}C$ 로 2時間에 걸쳐 表面을 酸化시켰다. 양 電極 모두 니켈電極이고 直徑 25 [mm]의 Rogowski形이다. 間隙長은 1[cm]로 고정되어 있고 또 陰極을 자외선으로 照射시키기 위하여 陽極 中心部에 直徑 1[mm]인 구멍이 뚫여 있다.

자외선 광원으로는 冷陰極形 저온 水銀放電管을 사용하여 一定한 強度의 光電子流를 얻었다.

排氣系를 그림 2에 表示한다. 유탄산과 유탄전 펌프로 배기하였다. 이때의 到達 眞空度는  $10^{-6}$ (Torr)이고 보다 높은 眞空度를 얻기 위하여 드라이 아이스를 사용하였다. 眞空度 測定은 熱陰極形 電離眞空計를 사용하였다.

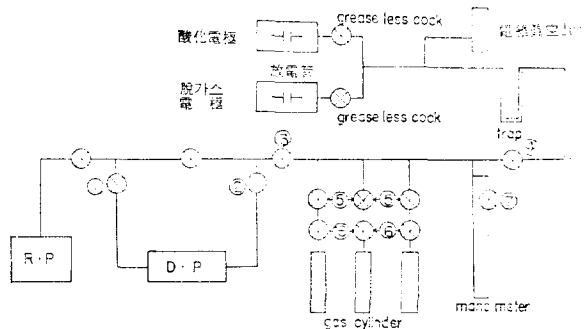


그림 2. 排氣系  
Fig. 2. Exhaust System

가스封入에 있어서는 그림 2의 排氣系에서 ③의 Cock를 닫고 가스의 種類에 따라서 ⑤ 및 ⑥ Cock로 가스 실린더로 부터의 가스의 封入시키는데 마노미터로 放電管 內에 일정한 pd값을 도입시킨 후 Grease-Less Cock를 닫고 放電管과 排氣系를 차단하여 放電管 內의 壓力이나 가스 순도가 實驗測定 中 一定하도록 하였다. 測定이 끝나면 grease-Less Cock와 ③의 Cock를 열고 15分間 排氣시키고 또 다음 pd값도 위의 순서를 되풀이 하였다.

測定回路를 그림 3에 表示한다. 放電이 글로우 放電으로 移行된 狀態로 間隙間に 長時間 電流를 흘리면 電極表面狀態가 變化될 우려가 있으므로 이것을 防止하기 위하여 分流加減回路(Diverter Circuit)를 사용하여 글로우放電이 되는 同時에 다이아트론(Thyratron)이 動作되도록 해 놓고 主放電을 정지시킬 수가 있다. 分流加減回路는 放電電流를  $10[\Omega]$ 인 저항으로 電壓을 변화시키고 增幅器로 100倍 增幅시켜 다이아트론을 動作하도록 하였다.

이 保護回路에 의하여 主間隙에 흐르는 放電電流의 피크値는  $10(mA)$  이하인 동시에 放電지속시간도  $150[\mu sec]$ 로 억제시킬 수가 있었다.

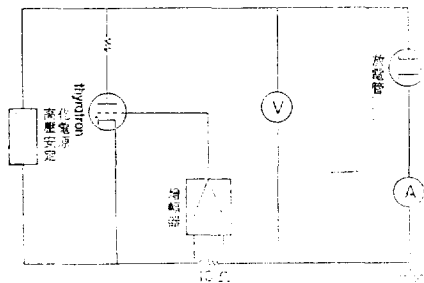


그림 3. 測定回路  
Fig. 3. Measurement Circuit

放電管은 2개 모두 暗상자를 써서 外部로 부터의 빛이 나 電氣的 影響을 받지 않도록 하였다.

여기서 混合가스라 함은 N<sub>2</sub>가스와 0.05%의 NO가스를 혼합한 것을 말함.

이하 本 研究에서 행한 實驗은 다음과 같다.

(1) 混合한 NO가스에 의한 安定 Townsend放電 및 電極表面의 影響

(2) 가스를 封入하였을 경우와 排氣시킨 狀態에서의 光電子流의 變化

(3) pd值를 變化시켰을 경우 脫가스電極과 酸化電極에 있어서의 Townsend放電의 印加電壓—放電電流特性.

### 3. 實驗結果 및 考察

(1) 混合한 NO가스에 의한 安定 Townsend放電 및 電極表面의 影響

純N<sub>2</sub>가스 中에서 脫가스 電極으로 安定 Townsend放電이 존재하는 pd값 20[Torr·cm]로 放電特性을 測定하였다. 또 결하여 酸化電極도 같은 條件에서 測定하였다.

특히 脫가스 電極으로 처음에 混合가스를 封入하여 放電特性을 測定하였는데 이때 미량인 0.05%의 NO가스로 인하여 脫가스 電極表面이 酸化되어 혹시 安定 Townsend放電이 消失될 우려가 있을까 생각되어 混

합가스를 排氣시킨 후 N<sub>2</sub>가스를 封入시켜 安定 Townsend放電의 有無를 조사하였다.

그림 4는 pd값 20[Torr·cm]에서 脫가스 電極과 酸化電極에 있어서의 混合가스와 N<sub>2</sub>가스의 印加電壓—放電電流特性을 그린 것이다. 脫가스 電極을 사용하여 처음에 混合가스를 넣고 印加電壓—放電電流特性에서 1,650[V] 印加하여 4.5×10<sup>-11</sup>[A]에서 글로우 放電으로 移行하였다. 여기서 安定 Townsend放電은 觀測되지 않았다.

다음 이 混合가스를 排氣시킨 후 N<sub>2</sub>가스를 封入시킨 경우인데 1,250[V] 印加시킨 곳에서는 급격한 電流上昇을 보이고 2×10<sup>-9</sup>(A)에서 紫外線을 차단하여도 放電電流는 降下하지 않고 自續放電으로 移行된 것이 確認되었는데 電壓은 一定한데 電流는 더 上昇하여 8.5×10<sup>-7</sup>(A)에서 停止하였다. 여기서 電壓을 上昇시키면 電流도 上昇하는 正特性인 安定 Townsend 放電(a→b)이 觀測되었다.

이 安定 Townsend放電領域은 印加電壓이 1,270[V]에서 1,430[V]까지이고 電流는 8.5×10<sup>-7</sup>[A]에서 1.1×10<sup>-6</sup>[A]까지 에서 觀測되었다.

또한 →印은 自續放電 開始電壓을 나타내고 …線은 글로우放電의 移行을 表示하고 있다.

N<sub>2</sub>가스에서 酸化電極은 脫가스 電極과 比較하여 50%程度 印加電壓 및 自續放電 開始電壓이 向上되고 있다.

같은 脫가스 電極에 있어서도 混合가스는 N<sub>2</sub>가스 보다 40%나 上昇되고 混合가스의 酸化電極과 脫가스 電極에서는 N<sub>2</sub>가스 程度의 差는 보이지 않지만 약 10%나 上昇되고 있다.

N<sub>2</sub>가스, 混合가스 모두 酸化電極 쪽이 脫가스 電極보다 印加電壓 및 自續放電 開始電壓이 上昇하고 있다.

(2) 가스를 封入하였을 경우와 排氣시킨 狀態에서의 光電子流의 變化

脫가스 電極表面이 NO가스에 의하여 어떤 影響을 받는가를 밝히기 위하여 電極間에 20[V] 印加시킨 狀態에서 N<sub>2</sub>가스, 混合가스, NO가스 順으로 약 1[Torr·cm] 封入시키고 약 3分後에 排氣시키는 것을 되풀이 하면서 光電子流의 變化를 조사하였다.

그림 5는 脫가스 電極으로 低pd值, 低電壓에서 가가스를 排氣 또는 封入시킨 순간의 時間的 變化를 펜 레코오더로 電壓—光電子流의 關係를 나타낸 것이다. 高眞空 中에서 電壓을 20[V] 印加하였을 때 電流는 10<sup>-13</sup>[A]이다. 이 경우 자외선을 照射시키지 않은 暗電流는 0.3×10<sup>-13</sup>(A)인데 沿面放電電流 印加는 확실치가 않다. 여기서 자외선을 조사시킨 것이 B點이고

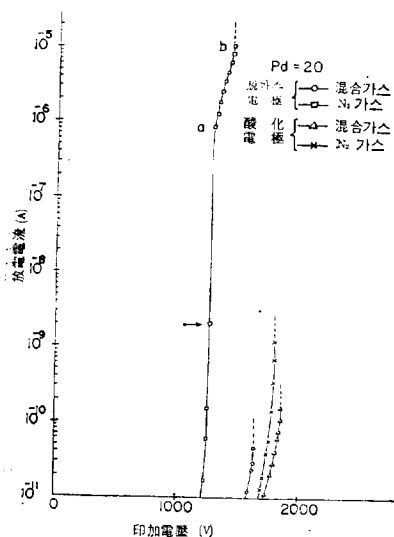


그림 4. N<sub>2</sub>가스 中의 微量 NO가스의 影響  
Fig. 4. Influence of NO Gas in N<sub>2</sub> Gas

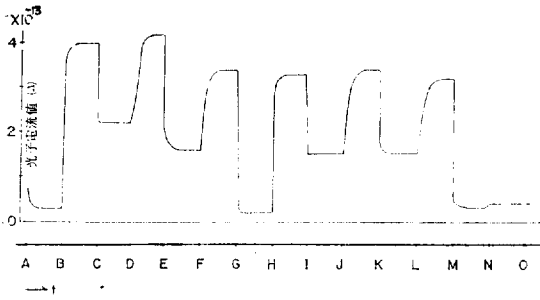


그림 5. 가스封入, 排氣와 光電子流의 變化  
 Fig. 5. Variation of Intermixed Gas, Exhaust and Photocurrent

표 1. 그림 5의 放電條件 및 放電電流值  
 Table 1. Discharge Condition and Discharge Current Value on

領域區間	放電間內的 狀態	電流值[A.]	備 考
A→B	자외선 조사 없음, 진공중	$0.3 \times 10^{-13}$	印加電壓
B→C	자외선 조사, 진공중	$4.0 \times 10^{-13}$	20[V]
C→D	자외선 조사, N <sub>2</sub> 가스 封入(1[Torr·cm])	$2.2 \times 10^{-13}$	一 定
D→E	자외선 조사, 배기 및 진공	$4.2 \times 10^{-13}$	眞空度
E→F	자외선 조사, 혼합가스 封入	$1.6 \times 10^{-13}$	10 <sup>-6</sup>
F→G	자외선 조사, 배기 및 진공	$3.4 \times 10^{-13}$	
G→H	자외선 조사 없음, 진공중	$0.2 \times 10^{-13}$	
H→I	자외선 조사, 진공중	$3.3 \times 10^{-13}$	
I→J	자외선 조사, N <sub>2</sub> 가스 封入(1[Torr·cm])	$1.5 \times 10^{-13}$	
J→K	자외선 조사, 배기 및 진공	$3.4 \times 10^{-13}$	
K→L	자외선 조사, 혼합가스 封入(1[Torr·cm])	$1.5 \times 10^{-13}$	
L→M	자외선 조사, 배기 및 진공	$3.2 \times 10^{-13}$	
M→N	자외선 조사, NO가스 封入(1[Torr·cm])	$0.3 \times 10^{-13}$	
N→O	자외선 조사, 배기 및 진공	$0.4 \times 10^{-13}$	

이하 各點을 표 1에 表示한다.

이 實驗에서 알 수 있는 것은 混合가스를 封入하거나 또 N<sub>2</sub>가스를 封入하거나 電流值가 억제되어 감소되고 있는 것이다.

N<sub>2</sub>가스(C→D)와 混合가스(E→F)와는 다소 차이가 있지만 NO가스(M→N)만큼의 큰 차이는 없다. 특히 NO가스(M→N)에 대하여는 眞空中에서 자외선을 조사하지 않았을 경우와 同等하게 電流는 억제되고 이 NO가스를 排氣시킨 곳(N→O)은 混合가스나 N<sub>2</sub>가스와 같이 電流는 거의 增加하지 않고 變化가 거의 없다. 이것으로 미루어 보아 NO가스는 이 脫가스 電極表面에 어떤 흔적을 남겼다고 생각이 된다. 그러나 混合가스 중의 NO가스는 불과 0.05%이므로 脫가스 電極表面에는 미량이기 때문에 거의 影響을 미치지 않는다는

것과 또 (1)項에서 말한 混合가스로 放電시킨 후 다시 N<sub>2</sub>가스를 封入하여 放電시켰을 때 安定 Townsend放電이 觀測된다는 것이 確認되었다.

특히 NO가스의 경우는 脫가스 電極表面을 酸化電極으로 變化시켰다고 생각된다.

(3) pd值를 變化시켰을 경우의 脫가스 電極과 酸化電極에 있어서의 Townsend放電의 印加電壓—放電電流特性.

N<sub>2</sub>가스, 混合가스 및 NO가스의 各 pd值의 放電特性을 測定하고 또 各各의 封入가스에서 脫가스, 酸化電極種類에 따라서 그 特性이 어떻게 달라지는가를 조사하였다.

(i) N<sub>2</sub>가스中的 放電特性

그림 6은 脫가스 電極에서 N<sub>2</sub>가스를 封入하였을 경우의 印加電壓—放電電流特性이다. 低Pd值의 1~4 [Torr·cm]에서는 自續放電開始後에 放電電流가 대단히 짧은 時間內에 급격히 增加하여 글로우放電까지 進전되고 있다.

pd值가 8~20 [Torr·cm]에서는 自續放電開始後에 放電電流는 완만하게 1~3자리 만큼이나 上昇하여 수 10초에서 수분후에는 一定해지고 이 狀態에서 印加電壓을 높이면 電流가 增加하는 正特性의 安定 Townsend 放電이 觀측된다.

이 狀態는 印加電壓 즉 放電管의 단자전압을 增加시키면 電流도 그것에 따라 增加하는 正抵抗 領域이다.

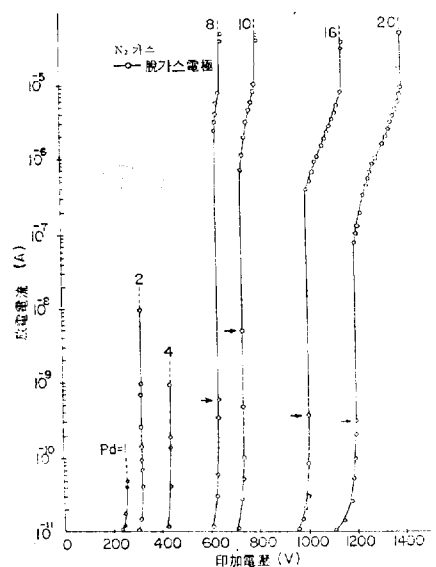


그림 6. 印加電壓—放電電流特性  
 Fig. 6. Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

· 自續放電 開始電流은  $10^{-8}$ [A] 이하이고 電流가  $10^{-7}$  [A]程度가 되면 비로소 陽極前面, 數mm 부근에서 빛을 내는 Townsend放電을 눈으로도 確認할 수가 있는 印加電壓을 더 增加시켜 放電電流를 增加시키면 發光은 陰極方向에 進전된다.

放電電流가  $10^{-8}$ [A]程度가 되면 陰極글로우를 수반한 글로우放電으로 移行하고 放電管 단자전압은 급격히 低下한다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 pd值가 8[Torr·cm]에서 20[Torr·cm]까지의 pd值의 增加에 수반하여 正特性으로 移行하는 電流值가 감소의 경향을 表示하고 있다. 그러나 글로우 放電 移行時의 放電電流는 대체로  $10^{-5}$ [A] 이상이고 一定하다.

pd值 8[Torr·cm] 이상에서는 自續放電開始電壓은 安定 Townsend放電의 自續開始點이다.

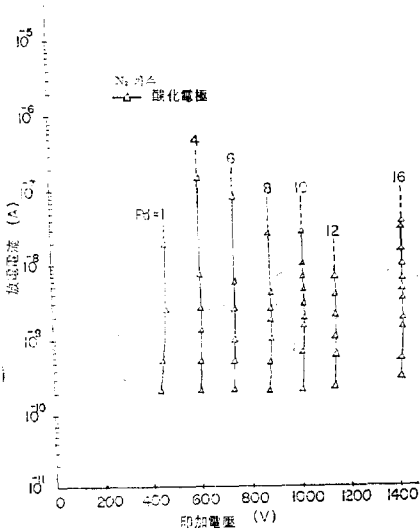


그림 7. 印加電壓—放電電流特性

Fig. 7. Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

그림 7은  $N_2$ 가스에서 酸化電極을 사용한 경우의 印加電壓—放電電流特性이다. 모든 pd值에 있어서 自續放電開始 後에 放電電流는 短時間內에 急增하여 글로우放電으로 移行하고 있다.

그림 6과 그림 7에서 脫가스 電極의 pd值 1~4 [Torr·cm]와 酸化電極의 모든 pd值에 있어서는 自續放電開始電壓이 글로우 放電 開始電壓이 된다.

이상과 같이 脫가스 電極만이 安定 Townsend放電이 나타나고 줄려 다른 放電特性을 表示하였다는 것은 가스空間에서  $\alpha$ 작용이 직접 관여치 않고 또 電極表面狀態가 安定 Townsend 放電의 有無에 영향을 미친다

는 것이 確認되며 陰極에서의  $\gamma$ 作用이 직접 결부될 가능성을 보여주고 있는데 이것은  $N_2$ 가스 중의 壽命이 긴 準安定狀態( $A^3\Sigma_u^+$ )에 의한  $\gamma_m$ 作用에 關係되어 있는 것이라고 생각된다.

(ii) 混合가스 중의 放電特性

그림 8(a), 그림 8(b)는 脫가스 電極의 混合가스 封入경우의 印加電壓—放電電流特性이다. 그림 9(a), 그림 9(b)는 酸化電極을 사용하였을 경우의 特性이다.

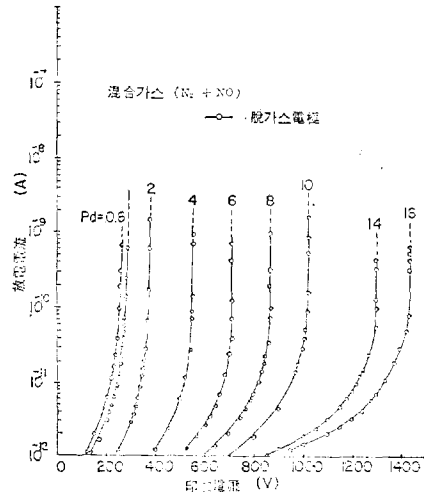


그림 8(a). 印加電壓—放電電流特性

Fig. 8(a). Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

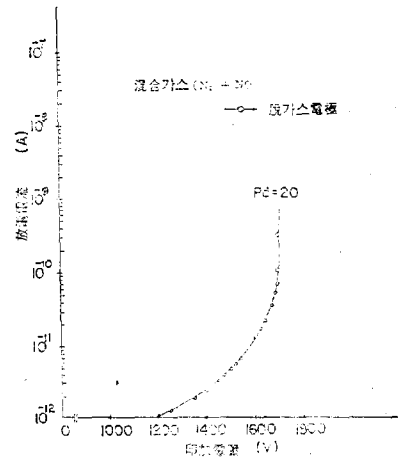


그림 8(b). 印加電壓—放電電流特性

Fig. 8(b). Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

그림 9(a), 그림 9(b)의 酸化電極에 있어서의 放電特性은 常연한 것이겠지만 그림 8(a), 그림 8(b)의 脫氣 電極에 있어서도 安定 Townsend放電은 관측되지 않는다.

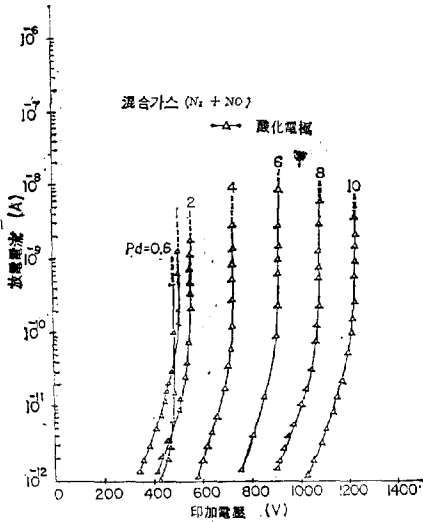


그림 9(a). 印加電壓—放電電流特性  
Fig. 9(a). Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

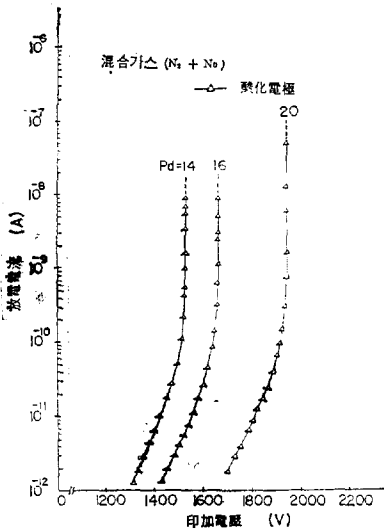


그림 9(b). 印加電壓—放電電流特性  
Fig. 9(b). Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

이 混合氣스의 放電特性은  $N_2$ 가스에 0.05%인 NO 가스를 封入하므로서  $N_2$ 의  $A^+\Sigma_u^+$ 를 이 미량의 NO가스가 消失케 하는 것을 表示하기 위하여 그린 것이나 安定 Townsend放電이 관측되지 않은 것은  $N_2$ 가스 중 에서 미량의 NO가스가  $A^+\Sigma_u^+$ 를 效率 좋게 脫勵起시킨 것이라고 생각되며 (1), (2), (3)項의 結果로 미루워 보아 미량의 NO가스는  $A^+\Sigma_u^+$ 를 脫勵起시키는 데만 作用하였다고 생각된다.

그리고 脫勵起된  $N_2$ 가스 중에서는 安定 Townsend 放電이 관측되지 않는다는 것이 實驗的으로 證明되었 다.

그림 8(a), 그림 8(b), 그림 9(a), 그림 9(b)에서 確實히 알 수 있는 것은 印加電壓 및 自續放電開始電壓에 있어서 酸化電極 쪽이 脫氣 電極 보다 모든 pd 值에서 向上되고 있다는 것이다.

(iii) NO가스 中の 放電特性

그림 10, 그림 11은 NO가스의 放電特性을  $N_2$ 가스 나 混合氣스와 比較하기 위하여 實驗測定한 結果이다. NO가스에 대하여는 反應성이 크고 金屬에 대한 부식 이나 人體에 대하여 有害성이 있으므로 세심한 注意를 하였다.

그림 10은 脫氣 電極, 그림 11은 酸化電極을 表示 한다. 두 그림에서 그 特性은 모든 pd值에서 거의 똑 같은 放電特性을 表示하고 있는 것을 알았다. 이것은 脫氣 電極表面이 (2)項에서도 말하였지만 쉽게 酸化

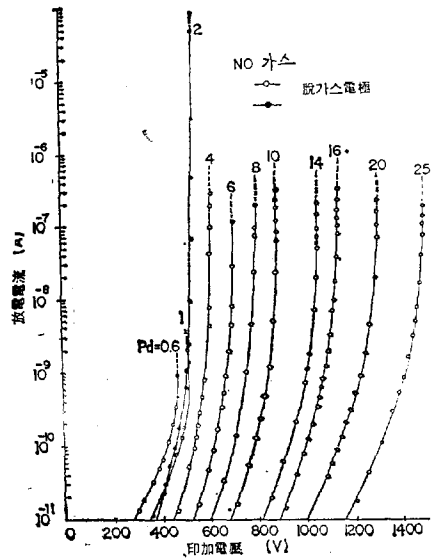


그림 10. 印加電壓—放電電流特性  
Fig. 10. Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

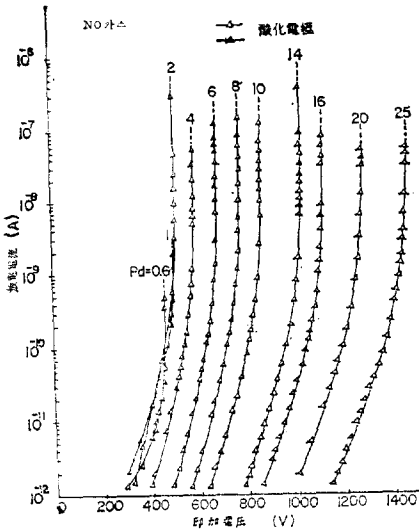


그림 11. 印加電壓—放電電流特性  
 Fig. 11. Characteristic of Applied Voltage and Discharge Current

되었다고 보아도 되고 酸化電極과 똑같은 특성이 얻어졌다고 말할 수 있다.

이 NO가스를 N<sub>2</sub>가스 및 혼합가스와 비교해 볼 때 똑같은 pd值에서는 NO가스의 故電電壓이 낮다는 것을 말할 수 있다.

4. 結 論

(1) 混合가스 중에 포함되어 있는 0.05%의 NO가스 만으로는 미량이므로 脫가스 電極表面은 하등의 영향을 받지 않지만 NO가스 중에서는 脫가스 電極은 酸化되었다.

(2) 脫가스 電極을 사용하여 N<sub>2</sub>가스 중에서 pd值가 8~20[Torr·cm]에서 安定 Townsend放電이 관측되었지만 混合가스를 封入한 경우는 安定 Townsend放電이 관측되지 않았다. 이것으로 미루어 보아 混合가스 중의 0.05%의 NO가스가 N<sub>2</sub>가스의 準安定粒子(A<sup>2</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup>)를 效率 좋게 脫勵起시켰다고 말할 수 있다.

(3) 封入가스가 N<sub>2</sub>가스와 混合가스일 경우는 酸化電極 쪽이 脫가스 電極 보다 모든 pd值에 있어서 放電電壓이 向上되고 있다.

(4) N<sub>2</sub>가스에 미량인 NO가스를 混入시킨 混合가스에서는 N<sub>2</sub>보다도 絶緣強度가 20%이상 向上하였다. 이것으로 미루어 보아 N<sub>2</sub>가스 중에 미량인 NO가스를 混合하므로써 絶緣材料로써 有用하다는 것을 알 수 있다.

끝으로 本研究는 1980年度 文教部 學術研究造成費로 이루어진 것을 부연하여 深甚한 감사를 드린다.

參 考 文 獻

1. 諸限, 後藤: 日本 電氣學會 全國大會論文集 pp.87~88 (1977)
2. M.E. Whitson, R.J. McNeal: J. Phys Vol 66, No. 6 p.2696 (1977)
3. J.W. Dreyer, D. Perner, C.R. Roy: J. Chem Phys Vol. 61, p.3164 (1974)
4. A. Lofthus, P.H. Krupenie: J. Phys Chem Ref Data Vol. 6, p.118 (1977)
5. S.C. Haydon, O.M. Williams: J. Phys. D. Appl. Phys Vol. 9 pp.523~536 (1976)
6. Electron Swarm Data: J. Phys Chem Ref. Data Vol. 4, p.727 (1975)
7. 西島, 中村: 日本電氣學會 放電研究會資料 ED-74-12 (1974)
8. 本多: 氣體放電現象(1977年)