

# 冷陰極을 이용한 Plasma 電子 Beam의 電氣的 入力特性(I)

論 文  
27~3~2

— 放電氣體의 影響 —

## A Study on the Electric Characteristics of Plasma Electron Beam Produced by Cold Cathode.

— The Effects of Discharge Gases —

田 春 生\* 朴 鏞 寬\*\*  
(Choon Saing Jhoun, Yong Kwan Park)

### Abstract

It has been investigated that electric characteristics of plasma electron beam in  $N_2$ ,  $H_2$  and Ar gas jars under various gas pressures during electron beams are formed. The results are as follows:

- 1) Electron beam is formed in the region of positive resistance on the characteristic curve. This phenomenon is identical in  $N_2$ ,  $H_2$  and Ar gases.
- 2) But in Ar gas, electron beam is formed at relatively lower gas pressure than in  $H_2$  and  $N_2$ .
- 3) In pure gas either  $N_2$ ,  $H_2$  and  $N_2$  the lower the gas pressure, the higher the voltage drop for the same electron beam current.
- 4) The region in which electron beam is formed is limited at a given pressure.
- 5) Beyond the limit mentioned above, it becomes glow discharge state and the current increases radically.
- 6) At a given gas pressure, electron beam voltage, that is, electrical power input increases with gap length.

### 1. 序 論

高融點 物質의 溶接 切斷 穿孔 熱處理 蒸着 또는 plasma 發生等 應用面에 大電力 電子 beam의 有用性이 크게 期待되고 있다.

電子 beam의 發生은 熱陰極을 電子供給源으로 하는 熱陰極 電子 beam과 氣體의 電離로 發生하는 plasma를 荷電粒子 供給源으로 하는 plasma 電子 beam으로 나눌 수 있다.

電子의 發生源으로는 主로 實用面에서 熱陰極을 지금까지 使用하여 왔다. 그러나 最近 冷陰極에 對한 研究가 새로운 角度에서 活潑하게 이루어지고 있으며 plasma를 利用하는 電子 beam源의 研究開發이 急速히 進行되고 있다.

plasma 電子 beam은 熱陰極 電子 beam에 比하여 眞空度가 낮고 電子beam發生裝置 自體의 構造가 簡單하고 機械的으로 견고하며 陰極汚染의 影響을 적게 받는 利點이 있다. 더욱이 陰極自體가 갖는 集束作用으로 인하여 自己集束性을 갖고있기때문에 集束을 爲한 強力한 外部 磁界가 必要없다.

plasma 電子beam發生裝置는 低眞空中에서 放電에

\* 正會員 : 仁荷大工大教授 · 工博(當學會編修委員)

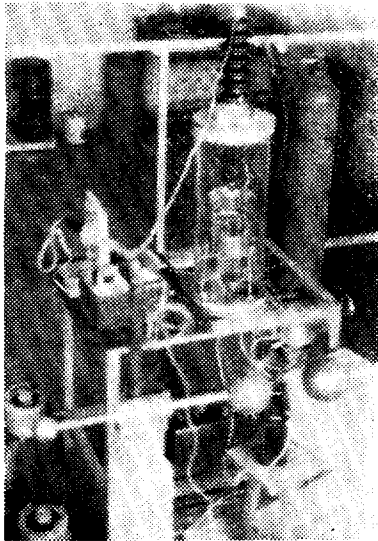
\*\* " : 忠北大工大助教授

接受日字 : 1978年 4月 10日

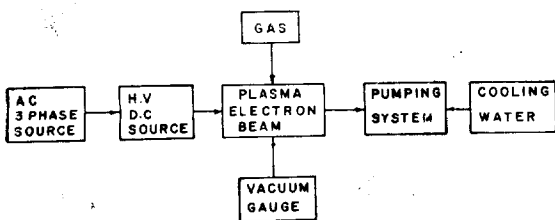
依하여 생긴 plasma를 陰極으로 하여 電子beam을 發生하는 것이며 1962年 Van Passen과 Stauffer가 開發에 着手한 以來 電子 beam 溶接機와 電子 beam溶融機等 電子beam을 加熱源으로 利用하는 裝置가 考案하게 되었다. 그러나 아직도 電子beam特性에 絶對的인 關係를 갖고있는 放電氣體의 영향에 對한 研究가 系統的으로 究明되어 있지 않다. 그러므로 本論文에서는 plasma電子 beam發生裝置를 試作한 過程과 實際應用에 있어 가장 널리 쓰이고 있는 霧圍氣 가스인 H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 및 Ar을 採用하여 이 中에서의 電子 beam의 電氣의 特性 즉 眞空度 및 電極間隙을 parameter로 하였을 때의 電壓-電流特性을 調査 한것이 提示되었다. 이리하여 가스의 種類에 따른 電子 beam의 形成狀態와 電氣的入力の 調整關係를 明白히 하여 電子beam 發生裝置의 開發을 위한 基礎資料를 얻을수 있었기에 于先 報告하는 바이다.

2. 實驗裝置 및 方法

本 實驗에 使用한 裝置는 plasma 電子beam發生部 排氣部 가스注入部 直流高壓 電源으로 構成된다. (그림



(a) Photo



(b) Block diagram

Fig. 1. Experimental apparatus

1(a),(b))

2-1 Plasma 電子beam發生部

放電室은 plasma의 形成과 電子beam의 모양을 外部에서 容易하게 觀察할 수 있게 하기 위하여 直徑 260 mm, 높이 600mm, 두께 10mm의 원통형 硬質 유리관을 使用하였고 兩端部에는 홈이 파져있는 鐵環을 設置하였다.

그리고 유리관의 上端部는 그림 2-a와 같이 中心에 bushing이 붙어있고 그 옆에 두개의 가스 valve가 달린 두께 20mm의 鐵圓板에 下端部는 眞空pump와 連結된 鐵板위에 各各 O ring을 介在하여 氣密性을 維持하게끔 接觸되어있다.

가스注入과 眞空計와의 連結部는 上記한 鐵板에 設置한 두개의 valve를 利用하였다. 유리관 下端部와 接觸되어있는 鐵板의 中心部에 直徑 80mm 두께 2mm의 銅圓板을 設置하였는데 이것을 陽極(target)으로 使用하였다. 이것과 陰極과의 間隙을 調節하게끔 氣密한 나사 裝置를 하였다. 上部鐵板과의 放電을 防止하고 陰極을 遮蔽하고 또 適當한 電界分布를 이루도록 陰極周圍에 원통형 鐵 shield極을 붙였다. shield極은 上下鐵板 및 target와 同電位로 接地하였고 中空陰極은 bushing內的 銅棒과 連結시켰다. 中空陰極의 치수는 Morley<sup>(6)</sup>의 條件式에 依하여 그림 3과 같은 形態로 設計 製作하였다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{D} &= 0.2 \sim 0.3 \\ \frac{d^3}{D^2 h} &= 0.1 \sim 0.2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 d: 電子 beam 放出孔의 直徑

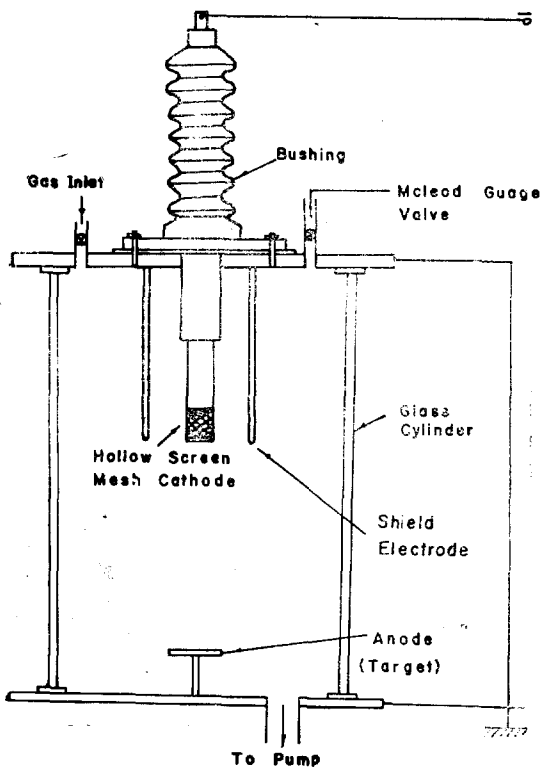
D: 陰極의 直徑

h: 放出孔 部分의 金屬板의 두께

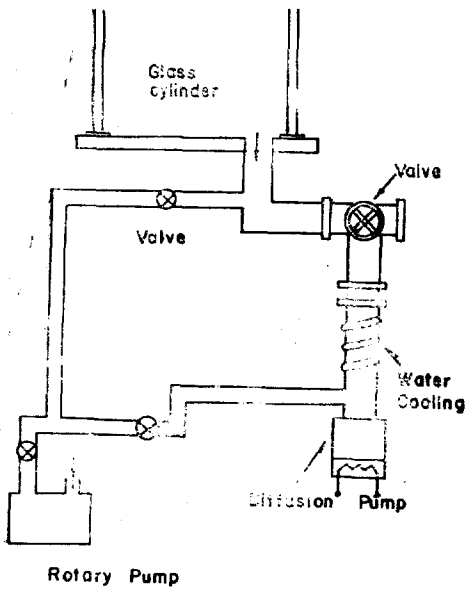
plasma 形成을 容易하게 觀察할 수 있게끔 이 中空陰極은 0.2mm의 高溫材料인 몰리브덴 線으로 網目 30mesh로서 直徑 27mm 높이 35mm가 되는 圓筒網을 만들고 이 上下部에 두께 2mm의 몰리브덴板을 附着시켰다. 下部 몰리브덴板中心部에는 式(1)에 가까운 直徑 6mm의 電子 beam의 放出孔을 뚫어 놓았다.

2-2. 排氣部

本 實驗의 眞空 排氣部는 그림 2-b와 같은 方式을 취하고 있다. 일단 回轉眞空 pump(獨逸 NEEDHAM HEIGHTS 會社製)로 5×10<sup>-3</sup>mmHg程度 排氣한 후에 擴散pump(油擴散pump型式 OF-120 到達眞空度 5×10<sup>-7</sup>mmHg 排氣速度 120L/sec 補助眞空度 2×10<sup>-1</sup>mm Hg 油量 100cc)로 다시 高眞空으로 하였다. 眞空 Hose로 容器內와 回轉 Mcleod 眞空計測定(範圍10<sup>-1</sup>~10<sup>-4</sup> mmHg)와 接續시켜 容器內의 眞空度를 測定하였다.



(a) Electron beam chamber



(b) Vacuum system

Fig. 2. Electron beam chamber and Vacuum system

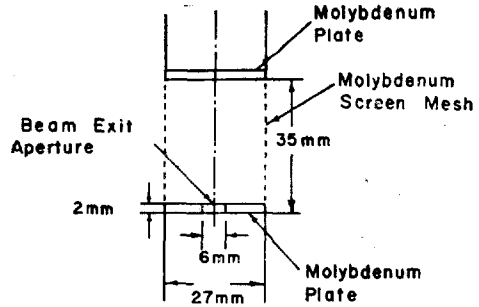


Fig. 3 Hollow screen cathode

2-3 高壓 直流電源

그림 4는 實驗에 使用한 直流高壓 및 交流高壓 電源 裝置이다. 本 裝置는 日本 東京트랜스會社 製品이며 主變壓器의 容量은 5kVA이다. 그림과 같이 1次側 電壓을 調整하여 2次側 電壓을 0~100kV까지 얻을 수 있으며 直流電壓은 Kenotron管으로 整流하여 역시 0~100kV까지 얻게끔 되어 있다.

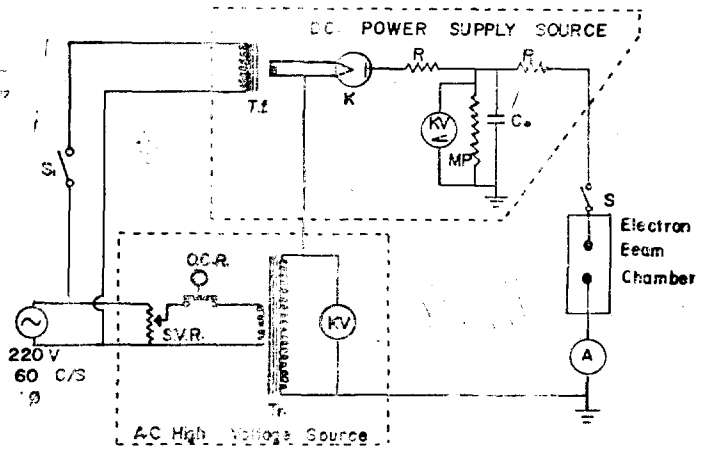


Fig. 4. Experimental electric circuit

放電室內의 target 즉 陽極은 抵抗을 통하여 (-) 端子에 接續 하였고 印加電壓의 上昇速度는 50V/sec 程度로 하였다. 容器內의 陰極과 target 사이의 間隙을 200mm로 調整 하였고 容器內의 空氣를 排氣 시키기 위하여 回轉 pump 만으로 1時間 가까이 排氣 시켜서 眞空度  $5 \times 10^{-3}$  mmHg 程度에 到達 했을때 直接 排氣 通路의 valve를 닫고 擴散 pump의 valve를 열어서 擴散pump를 動作시켰다.  $10^{-4}$  mmHg 가까이 되면 放電가스를 가스 cylinder로부터 容器上部의 valve를 통하여 서서히 注入시켜 monometer를 利用하여 1氣壓이 되게끔 채운다. 注入된 가스를 다시 上述한 같은 方法으로 排氣시켜 容器內의 가스에 不純物이 混合치

않게 하였다. 3번째로 가스를 注入 后부터는 미리 調査 해놓은 排氣時間과 眞空度の 關係에 따라 一定 時間 마다 放電室 內의 眞空度を 測定하고 電子 beam을 形成시킨 後 이 狀態에서 電子 beam의 電壓과 電流 關係를 調査 하였다. 勿論 이때의 電極間隙은 target를 上下로 움직여 調節하였다.

電子 beam電壓測定에는 美國 Beckman 計器會社製인 高壓 電壓計를 그리고 電流는 日本東京 電氣計器會社製인  $\pm 0.5$ 級的 電流計로 調査하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3-1 N<sub>2</sub>가스中의 電氣의 入力特性

그림 5는 容器內의 陰極과 target間의 電極間隙을 300mm로 하고 N<sub>2</sub>가스壓을 變化 시켰을때의 電子beam 電流와 電子 beam電壓과 關係를 나타낸 曲線이다. 그림 5에 나타낸 特性曲線은 電子 beam이 發生되는 領域에서 測定한 값이며 이러한 特性의 領域에서는 正特性을 나타낸다. 이 領域을 넘으면 電子beam은 사라지

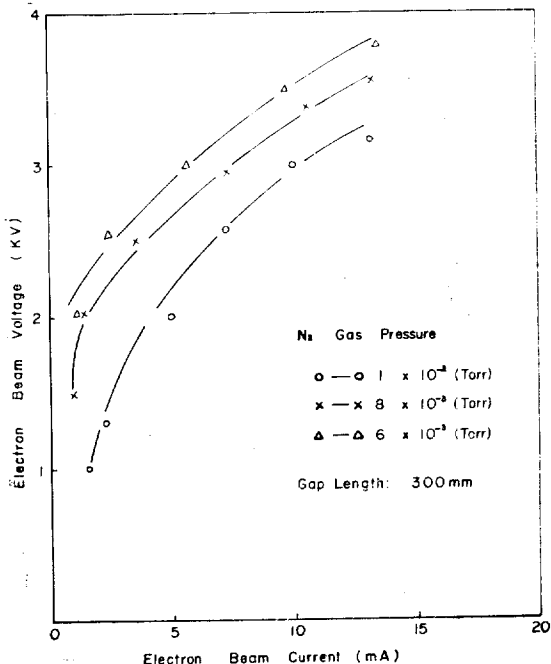


Fig. 5. Electron beam voltage VS. electron beam current

고 glow放電으로 變化되면서 급격한 電流增加를 가져 오고 電子beam電壓은 심하게 降下하는것을 볼수 있었다. 급격한 放電電流 增加는 電流測定에 많은 隘路를 주었다. 電氣的 入力特性은 가스壓에 敏感하게 變하고 同一한 電極間隙에서 가스壓이 저을수록 特性電壓은 上昇하여감을 알수 있다. 肉眼으로 觀察하면 印加電壓을

점차 增加시켜가면 陰極內外에는 미약한 빛이 發生 하면서 計器에 처음으로 電流의 指示가 나타났었고 계속 電壓을 上昇시키면 中空陰極內의 放出孔으로부터 電子 beam이 射出되기 시작하는 것을 볼 수 있었다. 더욱 電壓을 上昇시키면 中空陰極內의 빛은 밝아지면서 鮮명한 直線狀의 電子beam이 形成하는 것을 알 수 있었다. 中空陰極內의 plasma로부터 發散되는 빛은 미약한 螢光燈의 빛과 유사하며 plasma와 陰極內壁 사이에 이루는 暗部는 ion sheath가 形成된 것이라고 생각 할 수 있다. 그림 6은 N<sub>2</sub>가스中에서 電極間隙을 200mm로 短縮시켰을때 電氣의 入力特性을 나타낸 것이다. 電極間隙을 短縮시키지 않은 그림 5의 電氣의 入力特性과 比較하면 同一한 가스壓과 電子beam電流에서 電子

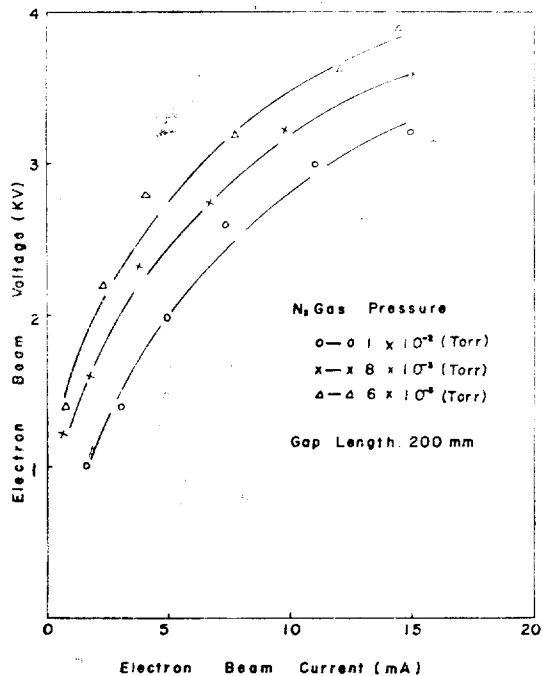


Fig. 6. Electron beam voltage VS. electron beam current

beam電壓은 減少하고 있다. 따라서 이 實驗結果에서 電子beam이 發生되는 領域에 있어서 같은 電極間隙에서는 가스壓을 減少시키고 同一한 가스壓에서는 電極間隙을 增加시키면 電氣의 入力은 계속 增加시킬수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 3-2 H<sub>2</sub>가스의 電氣의 入力特性

그림 7은 電極間隙이 300mm, 그림 8은 電極間隙이 200mm로 하였을때의 電子 beam 發生時的 電壓—電流 特性을 나타낸 結果이다. 그림 5의 N<sub>2</sub>가스와 같이 같은 電極間隙에서 調査한 結果 H<sub>2</sub>가스의 電氣的 入力特性은 N<sub>2</sub>가스의 特性과 類似性을 갖는다. 그러나 差異

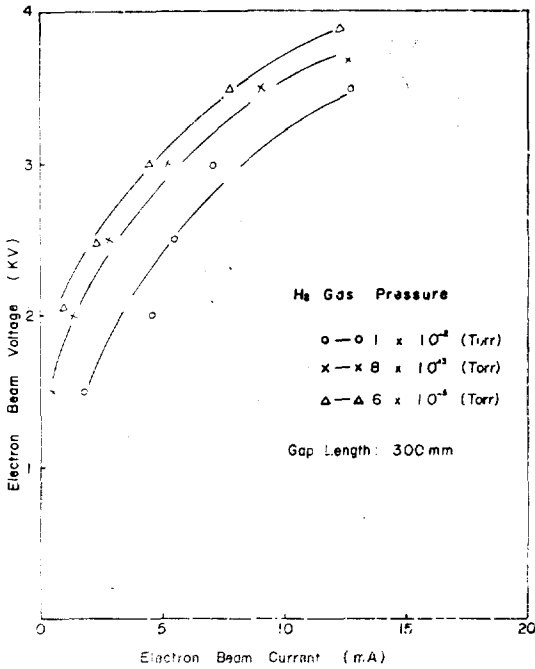


Fig. 7. Electron beam voltage VS. electron beam current

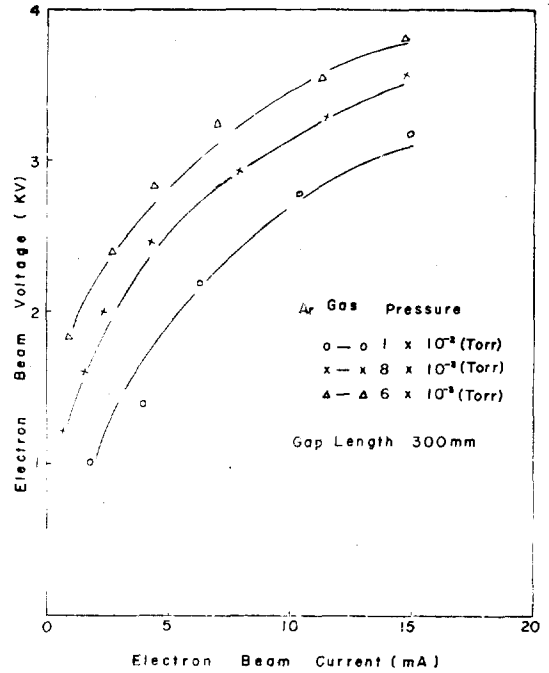


Fig. 9. Electron beam voltage VS. electron beam current

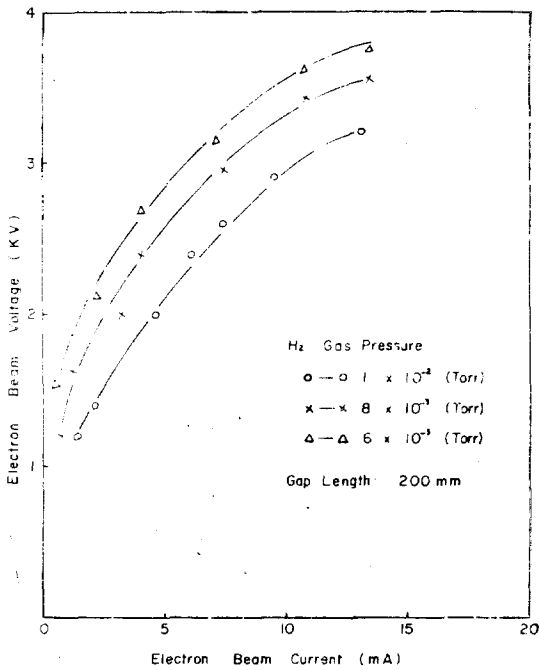


Fig. 8. Electron beam voltage VS. electron beam current

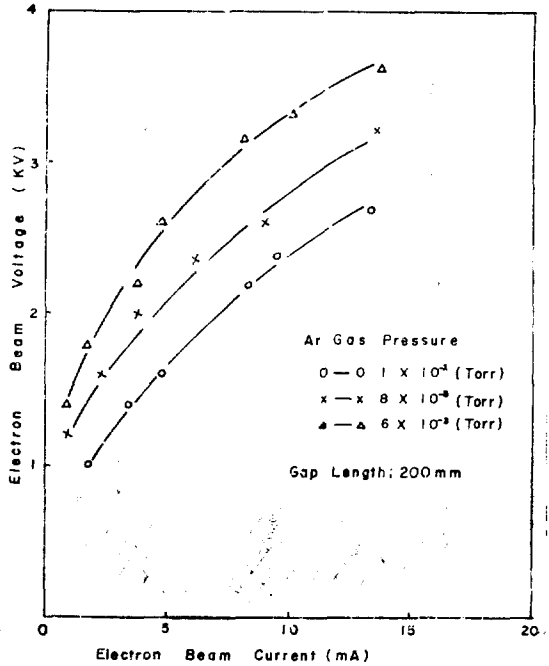


Fig. 10. Electron beam voltage VS. electron beam current

點은 H<sub>2</sub>가스에서는 N<sub>2</sub>가스보다 比較的 높은 가스壓에서 電子beam이 比較的 明瞭하게 發生하고 또 同一한 條件下에서 H<sub>2</sub>가스 中에서의 電氣의 入力이 N<sub>2</sub>인 경

우보다 크다는 點이다.

### 3-3 Ar가스의 電氣的 入力特性

그림 9와 그림 10은 電極間隙을 각각 300 및 200mm.

로 하였을때 가스壓의 變化에 있어서의 電子 beam電壓과 電流特性을 나타낸 結果이다. 前記의 N<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>가스의 경우의 電氣의 特性和 거의 비슷한 모양의 變化를 하고 있지만 같은 條件 下에서 電子 beam電壓이 가장 낮음을 알 수 있다.

低壓 氣體中에서의 電子에 의한 衝突電離現象을 보면 同一한 電子에너지 에서 가스의 離雜確率は Ar, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>의 順位로 높은 값을 가진다. 또 擴散現象은 가스의 原子量에 關係하므로 質量이 적은 가스 일 수록 荷電粒子的 損失이 크게 된다. 따라서 이 두 原因으로 말미암아 電子 beam電壓이 H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar의 順으로 높아진다고 생각할 수 있다.

電子 beam을 利用하는 條件에 따라 霧潤氣 가스가 決定되지만 電氣의 入力 增加의 手段으로는 H<sub>2</sub>가스를 採用하는 것이 바람직한 일이라고 사르된다.

이와같이 放電가스 種類에 따라서 電氣의 入力特性이 꽤 다른데 이것을 다음과 같이 考察할 수도 있다. 低壓가스中의 Schumann의 放電開始條件과 電子의 衝突電離係數, 電界의 세기 및 가스壓의 3者 關係를 나타내는 理論式에서 放電開始電壓을 나타내는 Paschen의 法則을 다음 式과 같다.

$$V_s = B \frac{pd}{\ln \left\{ \frac{A pd}{\ln \left( 1 + \frac{1}{r} \right)} \right\}} \quad (2)$$

여기서  $p$ : 가스壓

$d$ : 電極間隙

$r$ : 陰極에 衝突하는 한個의 正ion에 의하여 放出되는 平均二次電子數

$A, B$ : 가스 種類에 依하여 달라지는 定數

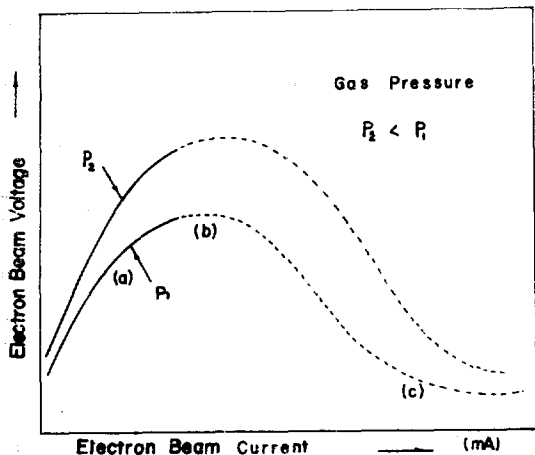


Fig. 11. Electron beam voltage and current characteristic

上記式에서 가스 種類가 달라지면  $r$ 와  $A, B$ 定數가

變하므로 放電開始條件을 滿足하기 爲한 換算거리( $pd$ )s가 달라짐을 豫想할 수 있다.

放電開始에 關한 Paschen의 曲線의 實測 結果에 依

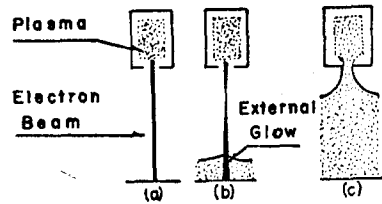
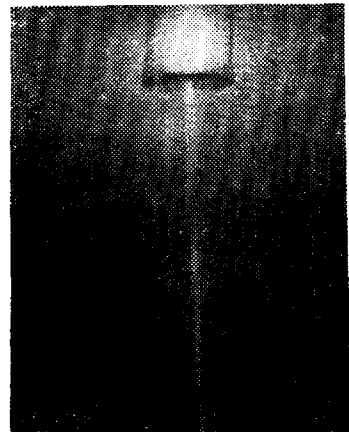


Fig. 12. Discharge modes

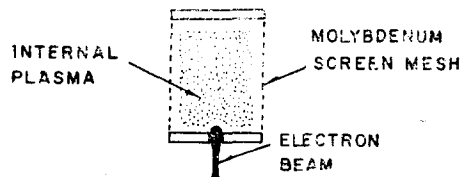
하면 放電開始條件을 滿足하는 換算거리( $pd$ )s는 가스의 種類에 依하여 相異함은 明白한 일이다.

### 3-4 電子beam 發生過程

N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>가스를 使用하여 高眞空의 여러 가지壓 電極間에 따라 電壓-電流의 電氣의 特性을 종합하여 觀察한 結果는 다음과 같다. 一般의으로 그림 11와 같이 電壓의 增加에 따라 電子beam電流가 增加하는 正特性 領域인 (a)部分에서 電子 beam이 發生하며 放電形狀은 그림 12의 (a)와 같이된다. 電壓이나 電流가 모두 增加하여 그림 11의 曲線 (b)의 領域 部分에 오면 放



(a) Electron beam



(b) Internal plasma

Fig. 13. Electron beam and internal plasma

電形狀은 그림 12-(b)와 같이 山의 모양을 한 外部 glow를 發生한다. (b)의 領域을 넘으면 급격한 電流 增加와 함께 外部 glow가 增加하여 電子 beam은 없

어지고 그림 12 (c)의 形狀으로 變한다. 그 以後의 電壓-電流는 負特性인 點선을 따라 變하는 것을 알 수 있었다.

그림 13은 中空陰極內的 plasma로 부터 電子 beam이 放出하는 狀態를 나타낸 것이다.

#### 4. 結 論

以上の 結果에서 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

(1) 電子 beam은  $N_2$ 와  $H_2$ , Ar가스 모두 正特性을 나타내는 領域에서 發生한다.

(2) Ar가스에서는  $H_2$ ,  $N_2$ 가스보다 가스壓이 적은 狀態에서 電子 beam이 發生한다.

(3) 同一한 가스에서 가스壓이 낮을수록 電子 beam 電壓이 上昇한다.

(4) 一定한 가스壓에서 電子 beam이 發生되는 電壓-電流領域은 限定된다.

(5) 電子beam發生領域을 넘으면 glow放電狀態로 移行하여 급격한 電流增加가 나타난다.

(6) 同一한 가스壓에서 電極間隙을 크게 하면 一定流에 대한 電子beam電壓 즉 電氣的 入力은 커진다.

끝으로 本 論文은 1976年度에 財團法人 新星産學財團에서 支給한 研究費에 依하여 이루어진 結果임을 밝히둔다.

#### 參 考 文 獻

1) L.M. Lidsky and S.D. Rothleder, D.J. Rose and S. Yoshikawa: "Highly Ionized Hollow Cathode Discharge." J.A. Phys. 33, (1962) 2490.  
 2) L.M. Field and K. Spangenberg: "Control of Electron Beam Dispersion at High vacuum by Ions." Electrical Communication, 24, 101 (1947).

3) J.R. Pierce: "Theory and Design of Electron Beam" D. Van Norstand Company, Ind Princeton (1954).  
 4) R.D. Frost, O.T. Purl, H.R. Johnson: "Electron Gun for Forming Solid Beams of High Performance and High Convergence", Proc. IRE 50, 8(Aug, 1962).  
 5) J.R. Morley: Proceedings of the Electron Beam Symposium Sin Annual Meeting, 66(1964).  
 6) 菅田榮治 稱邑清也 究: 新しい電子ビームアナライザとその電子銃研究への應用, 日本電氣通信學會雜誌, Vol. 49, No. 5, p. 876(1966).  
 7) Hiroshi Hamada and Masazumi Terada: Characteristics of Plasma Electron Gun Using Electron Beam Mode Discharge Phenomena" Appl. Phys. (Japan) Vol. 41, No. 3, p. 238(1972).  
 8) 平野克己, 間島和夫: プラズマフォーカス, 電氣學會論文誌, 51-A70, pp. 543~550(1976).  
 9) 岡田實, 荒田吉明: プラズマ工學, 日刊工業新聞社, pp. 461~512(1965).  
 10) 日本電氣學會放電專門委員會: 放電ハンドブック  
 11) 菅田榮治: 電子イオンビームハンドブック, 日本學術振興會 第132委員會 p. 64.  
 12) A. Von Engel: Ionized Gases(OXFORD) pp. 282~286(1965).  
 13) 葛西彪等, 武藤喜入, 木協久智: 高周波プラズマの溫度測定" 應用物理 39, pp. 168~172(1970).  
 14) 田春生: "分光學的方法에 依한 Plasma Jet의 溫度分布測定" 大韓電氣學會誌 26-2-9(1977), pp. 104~110.  
 15) 日本電氣學會: 放電現象, pp. 26~42(1960).  
 16) 日本電氣學會編: 電離氣體論 1969.