

Flowing Gas의 방전특성에 관한 연구

오 제 열 이 광 식 이 봉 인
영 남 대 학 교

A Study on Sparkover Discharge Characteristics of Flowing Gas

Jae-Youl Oh^o, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee
Yeungnam University

Abstract

This paper reports the characteristics of sparkover discharge in flowing gas ranging from 0[m/s] to 30[m/s] under the needle-rod gap.

The important results obtained from this paper are as follows.

1. The maximum sparkover voltage of flowing gas are about 3.1[kv](d = 1[cm]), 5.4[kv](d = 2[cm]), 8.1[kv](d = 3[cm]) higher than those of static gas
2. The empirical equation obtained from this experiment is

$$[\%] \frac{Vs}{Re} = A \log_{10} Re + B$$

$$\text{where } A = -7.79 \times 10 \\ B = 5.60 \times 10^2$$

3. The duration time of sparkover decreases with increasing the Reynolds number.
4. The discharge pattern can be controlled by adjustment of the Reynolds number

1. 序論

경제성장에 따라 전력수요가 증가하고 전력수요의 증대에 따라 전력계통 및 각종 電氣機器들은 高電壓化 된다. 우리나라에서도 향후 800 [kv]급의 송전망으로 승압할 것이 요구되고 있다.^[1] 또한 정부에서는 수입대체분야중 전력용 차단기를 지정하여 국산화하고자 진행중에 있다.

氣體誘電體중에서 空氣는 電氣를 이용하기 시작한 이래 오늘날 까지 誘電體로서는 물론이며 放電時의 여러특성을 응용하여 유용하게 이용하고 있는 실정이다. 靜止狀態에 있는 氣體誘電體의 Arc의 消滅性보다 流動時의 소호능력이 더욱 우수하므로 최근에는 유동상태의 氣體誘電體의 방전특성 연구에 많은 관심이 집중되고 있다.

각국에서는 gas blast형인 GBB 차단기를 채택하여 그 용량의 증대를 도모하고 있다.^[2] 또한 Laser 발생기의 대용량화 및 소형화를 위하여 流動氣體의 방전특성 연구가 활발히 진행중에 있다.^[3-4] 뿐만아니라 Air blast circuit breaker(ABB), Electro gas dynamic generation(EGD 발전), Ozone Generator등 넓은 영역에 걸쳐 응용되고있다.

1980년대 초반부터 1986년 초반까지 일본의 原 등은 Ion 風의 帶電特性, Ion 風速特性, Ion 風 反動力特性, Ion 流場의 電界特性 등 諸現象에 관하여 활발히 연구하였다.^[5-6]

최근 關谷, 高木, 李 등이 氣流에 의해 공간전하를 의도적으로 변화시켰을 때의 放電路姿態 및 Corona 特性 放電에 관하여 활발히 연구 검토 하였다.^[7]

그러나 국내에서는 流動氣體의 방전특성에 관한 연구는 극히 미흡한 상태에 있다.

이러한 관점에서 본 연구는 공기의 유동에 따른 전로파괴 전압의 상승관계를 연구할 목적으로 방전이론 및 유체역학적인 이론을 적용하여, Reynolds number(Re)와 공기의 전로 파괴전압(Vs), Re와 전로파괴시의 방전로 모양과의 관계를 연구하고, 전로파괴시 전압 및 전류파형을 관측하여 전로파괴의 소호특성을 연구 검토하며, 또한 Re의 조정에 의하여 공기의 방전형식의 제어에 관한 연구를 위하여 방전초기의 전압, 전류를 일정히 하고 Re를 변화시켜 갈 때 방전형식의 변화 Pattern을 연구 하고자 한다.

2. 流速分布 理論

潤滑한 水平直圓筒管內에 非壓縮性 粘性流體가 흐름 경우 관입구에서 助走距離(Inlet length)이후에서는 관의 전단면에 걸친 速度分布, 管 摩擦에 의한 壓力損失의 比率 및 관단면을 지나는 유체의 운동에너지는 일정한 상태가 된다.^[8]

유체의 흐름은 시간에 따라서 유속이 일정한 層流 영역과 변화가 심한 亂流영역이 있으며 이들 즉 層流와 亂流가 공존하는 遷移 영역으로 구분된다.

위와 같은 경우 層流의 영역에서 연속의 식은 다음 식(1)로 표현된다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

외력이 없는 경우의 Navier-Stokes 식은

$$\left. \begin{aligned} \frac{DU}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right\} \\ \frac{DV}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right\} \\ \frac{DW}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

과 같이 된다.^[9-10]

x, y, z : 공기의 흐름 방향을 x 축으로 하였을 때 직각좌표계 U, V, W : x, y, z 방향의 속도 성분

t : 시간

P : 유로내 압력

ρ : 공기밀도

ν : 동점성계수 (1.7×10^{-5})

위의 식(1),(2)에서 層流에서의 流速式(3)을 얻을 수 있으며, 또한 최대유속 (U_{max})과 평균유속(U_{mean})과의 관계를 (4)式으로 나타낼 수 있다.

$$U = U_{max} - \frac{\Delta P}{4\mu l} r^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$U_{mean} = \frac{1}{2} U_{max} \dots\dots\dots (4)$$

l : 원통관과 동축인 가상유체 요소의 원통길이

ΔP : l 의 상단면과 하단면 사이의 압력차

μ : 점성계수

r : 가상유체 요소의 반경

U_{max} : x 방향의 최대유속

U_{mean} : x 방향의 평균유속

層流는 유체분자들이 질서 정연하게 흐르고 있는 상태에서 유체 입자의 層과 層 사이에서 운동량의 변화만 있는 흐름이고, 亂流는 유체 입자들이 아주 심한 불규칙한 운동을 하면서 상호간에 격렬한 운동량의 교환을 하면서 흐르는 상태이다. 이와 같이 서로 판이한 流動 특성을 나타내는 層流와 亂流의 구분을 Re 로 구분할 수 있다. Re 는 (5)式으로 표현된다.

$$Re = \frac{U_{mean} 2r_0}{\nu} \dots\dots\dots (5)$$

U_{mean} : 관속에서의 유체의 평균속도

r_0 : 관의 직경

이때 動粘性係數는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (6)$$

일반적으로 원통관의 흐름 (pipe flow)에 대해서 다음과 같은 관계가 된다. [11-12]

- $Re \leq 2300$: 層流
- $2300 \leq Re \leq 4000$: 遷移領域
- $Re \geq 4000$: 亂流

다음은 亂流에서의 流速分布式인 Nikuradse의 식 [13] 즉 식 (7)을 이용하여 U_{mean} 과 U_{max} 와의 관계를 식(8)로 표현할 수 있다.

$$U = U_{max} - 2.5 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \frac{r_0}{r_0 - r} \dots\dots\dots (7)$$

$$U_{mean} = \frac{1}{1 + 1.326\sqrt{\lambda}} U_{max} \dots\dots\dots (8)$$

위와 같이 하여 亂流分布式은 식 (9)와 같이 되며, 管摩擦係數는 $Re \leq 10^5$ 인 범위에서는 Blasius 式 즉 (10)式, $Re > 10^5$ 인 범위에서는 Nikuradse 式 즉 (11) 式을 이용하였다.

$$U = (1 + 1.326\sqrt{\lambda}) \cdot U_{mean} - 5.75 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} U_{mean} \dots\dots\dots (9)$$

$$\log_{10} \frac{r_0}{r_0 - r} \dots\dots\dots (9)$$

r_0 : 관의 반경

λ : 관의 마찰계수

λ 는 Blasius 式과 Nikuradse 式인 (10), (11) 式을 이용하였다. [11, 14]

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} \quad (Re \leq 10^5) \dots\dots\dots (10)$$

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 \cdot Re^{-0.297} \quad (Re > 10^5) \dots\dots\dots (11)$$

최대유속과 평균유속의 비를 Re 에 따라 도시하면 그림 1의 실선으로 표현되는데 層流에서는 0.5이고 遷移域을 지나서 亂流일 때는 증가되어 0.87 정도로 된다.

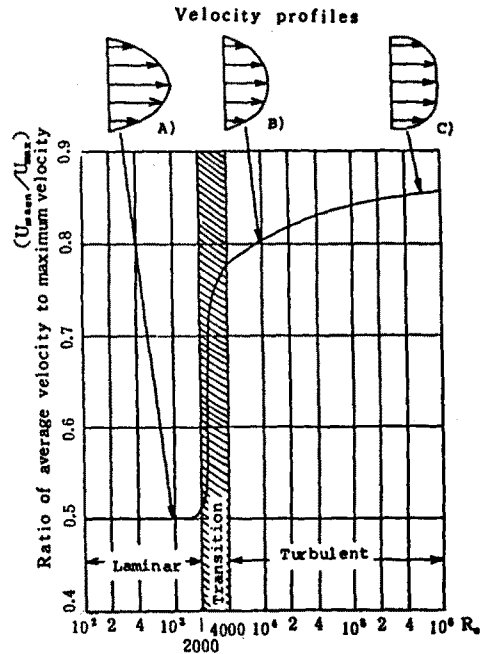


그림 1. 원활한 원관의 U_{mean}/U_{max} 와 Re 의 관계

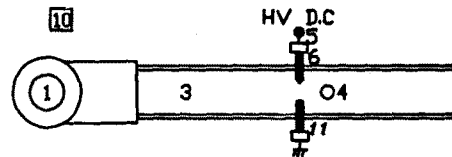
3. 實驗裝置 및 方法

3-1. 實驗裝置

그림 2에 본 실험을 위한 장치의 배치도를 나타내었다. 본 실험에 사용된 電極은 직경 0.5 [cm]인 황동계 棒電極과 동일한 棒을 침에도 θ 를 15° 로 한 원수형 침단을 가진 針電極(극판반경 1.35×10^{-2})을 사용하였다. 電極은 상류에서 조주거리 이후인 293.1[cm] 떨어진 지점에 원통관의 직경축에 수평 배치하였다.

실험에 사용된 전원은 직류 고전압을 얻기 위하여 (-)직류 고압발생장치(입력전압 110[V], 60[Hz], 출력전압 60[kV], Hipotronics inc.)를 사용하였으며, 고전압을 측정하기 위하여 Voltage divider와 digital kilovoltmeter를 사용하였다.

또한, 流動氣體는 室内空氣 (온도 $17 \pm 2[^\circ C]$, 습도 $60 \pm 1[\%]$, 기압 1011 ± 1 [mmHg])를 blower로 유도시켰다.



- 1. Blower 2. Voltage regulator 3. Circular dust
- 4. Velocity measurement hole 5. Micrometer
- 6. Needle electrode 7. Manometer 8. Oscilloscope
- 9. Digital kilovoltmeter 10. D.C high voltage source
- 11. Rod electrode

그림 2. 실험장치의 배치도

3-2. 實驗方法

전도파의 소호특성을 관찰하기 위하여 전극간 거리를 1, 2, 3[cm]로 하였을 때 유속을 $0 \sim 30$ [m/sec] 까지 변화시켜 가면서 전도파의 전압[Vs]과 공기의 평균유속 (U_{mean})과의 관계를 측정하였으며, 측정치는 5회 측정하여 산술평균 하였다.

전도파괴 전압은 전압상승 속도를 5[kV/s]로 상승시켜 갈 때 전도파괴가 일어나 전원이 자동차단 될 때의 전압이다. 이때 유속은 유체현상과의 관계를 알아보기 위해 式(5)를 이용하여 Re로 변형하여 제특성을 Re와의 관계로 바꾸어 검토하였다.

이때 10차리에서 반음림한 값을 Re로 사용하였다.

그리고, 전도파괴 소호특성은 전극간 거리를 1[cm]로 유지하고 유속이 2[m/s]일 때 전압을 14.5[kV]로 해서 전도파괴를 지속시켜 놓고 유속만 증가시켜 가면서 放電路 모양과 전압, 전류 파형을 관측하였다.

편의상 Re의 영역은 다음과 같이 세 영역으로 구분한다.

- 低 Re 영역 : $0 < Re < 1.56 \times 10^4$
- 中 Re 영역 : $1.56 \times 10^4 < Re < 4.7 \times 10^4$
- 高 Re 영역 : $Re > 4.7 \times 10^4$

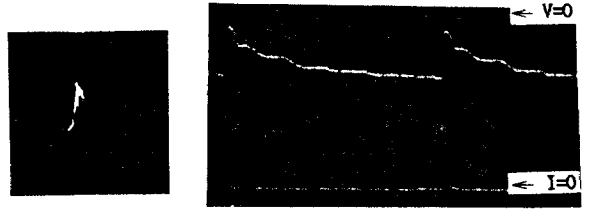
4. 結果 및 檢討

4-1. Re의 변화에 따른 방전형식의 변화

전술한 것과 같이 극간거리 1[cm] 일때 정지상태에서 (-) 직류전압 (14.5 [kV]) 을 인가하여 전도파괴를 유지시키고 Re만 변화시켜 갈 때의 전형적인 Sparkover discharge path (SDP)의 姿態를 사진 1에 나타내었다. 사진 1은 Re에 따른 放電路 모양을 나타내는데 a)는 정지상태에서의 SDP인데, 棒電極 兩端部의 電界強度가 크므로 棒電極 兩端部에서 針電極으로 全路破壞가 일어나고, 低 Re 영역의 전형적인 SDP는 사진 b)와 c)의 유형으로 나타나는데 低 Re에서는 사진에서 보는 바와 같이 SDP의 양상이 심한 변화를 나타낸다. 또한 Re가 커짐에 따라서 針電極 후면 보다 棒電極 후면에 와류가 더 빨리 그리고 더 심하게 형성된 결과 그림 1의 b) 및 c)의 유형의 放電路가 사진 1의 3)과 같이 棒電極 측으로 放電路가 편이하게 된다. 그러던 위에서 서술한 바와 같이 放電路의 변화에 관하여 구체적으로 살펴보기로 한다.

먼저 低 Re 영역에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 유속 분포는 b)형에서 c)형으로 변화되는 과정이다. 그러므로 corona에 의하여 생성된 전하가 유속분포에 준하여 움직이므로 이곳에 전계가 강화되어 放電路의 모양은 사진에서와 같이 많은 변화를 가져온다. 그 결과로서 전압, 전류파형 또한 사진 1의 1), 2), 3) 과 같은 모양의 변화를 가져온다. Re를 더욱더 증대시켜 高 Re 영역이 되면 전도파괴와 corona가 교번하여 발생한다.

이 결과를 보면 流動 gas의 방전형식은 Re를 조정하므로 제어 가능하다고 판단된다.



(c) $Re = 1.56 \times 10^4$ (3) $Re = 1.56 \times 10^4$
 T = 10ms/div
 V = 8kV/div, A = 6.3mA/div
 사진 1. 입력전력이 일정한 경우 방전로 및 전압, 전류파형

4-2. Re와 Vs와의 관계

Re의 변화에 따른 Vs의 특성은 그림 3과 같다.

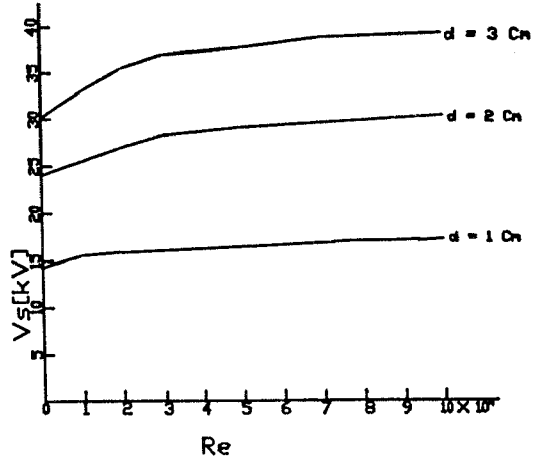


그림 3. 전도파괴 전압과 Re와의 관계

축 電極간 거리에서 전압상승율은 다르나 低 Re 영역에서 수 전압상승율이 크며, 中 Re 영역에서는 전압상승율이 완만하고, 高 Re에서는 거의 포화되는 경향이 있다. 전도파괴 전압과 전극간 거리의 관계를 그림 4에 나타내었다.



(a) $Re = 0$ (1) $Re = 0$
 T = 10ms/div
 V = 8kV/div, A = 6.3mA/div



(b) $Re = 0.62 \times 10^4$ (2) $Re = 0.62 \times 10^4$
 T = 10ms/div
 V = 8kV/div, A = 6.3mA/div

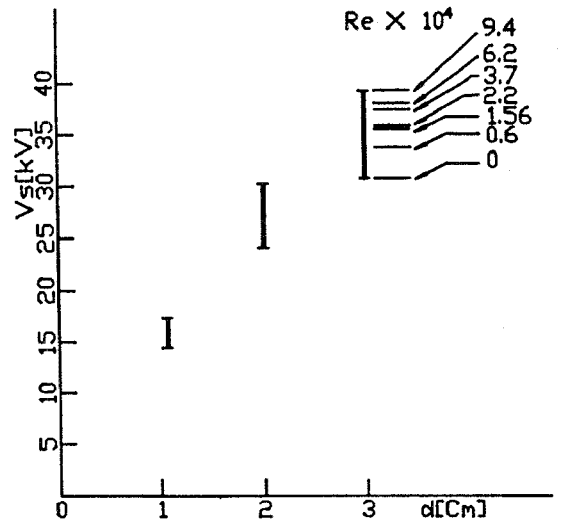


그림 4. 전도파괴 전압과 전극간 거리와의 관계

그 결과 流動時의 최대 전도파괴 전압은 정지시 보다 평균 $d=1[cm]$ 일 때 3.1[kV], $d=2[cm]$ 일 때 5.4[kV], $d=3[cm]$ 일 때 8.1[kV] 높게 나타났다.

低 Re 영역에서는 전압상승율이 크게 나타 나는데 이것은 그림 1에서 보는 바와 같이 유속분포가 가장 심한 변화를 하는 영역이므로 이에 준하여 전하분포의 변화 또한 가장 심하게 변화한다. 그 결과 Vs의 상승도 가장 큰 변화를 가져온다.

이것은 corona에 의하여 생성된 전하가 下流로 偏移되므로 하류의 전계가 강화된 결과 放電路가 유속분포에 준하여 하류로 형성된다. 그 결과 1) 放電路가 하류로 偏移되어 공기와 접촉면적이 증가하여 放電路의 冷却이 촉진, 2) 기류에 의한 전극의 冷却, 3) ion이 하류로 흘러가므로 전극주위의 전하운집의 약화 [14-18], 4) 정지시에는 放電路가 전극 상호간을 잇는 軸上에 있으나 流動하므로 放電路는 하류로 偏移하여 放電路가 길어진다. 放電路가 길어지면 反對極性 ion 사이의 再結合 係數가 증가한다. 왜냐하면 放電路가 길어지면 그들 ion들이 공존하는 시간이 길어지기 때문이다.

위의 1), 2), 3), 및 4)의 사항들이 원인이 되어 Re가 증대되어 갈 때 방전지속시간이 짧아지게 된다. [2.16] (OHP참조)

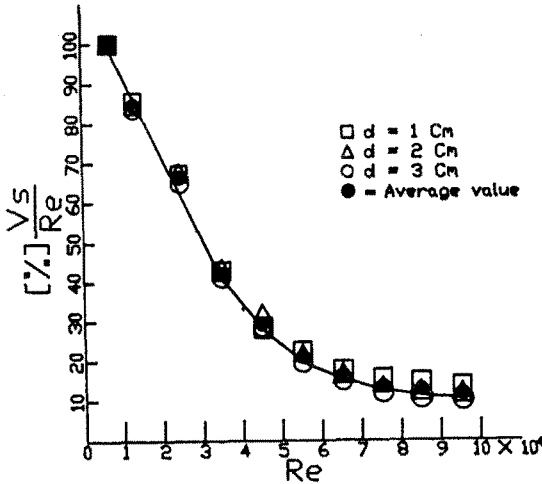


그림 5. [%]Vs/Re 와 Re의 관계

본 연구의 결과를 그림 5에 나타내었는데, 이것은 횡축에 Re, 종축에는 [%]Vs/Re 를 표시한다.

여기서 [%]Vs/Re 는 각 d에서 첫 구간 즉 Re = 0~10⁴에서 Re에 대한 Vs의 상승율을 100[%]로 정하고, 이것에 대한 각 구간의 Re에 대한 Vs의 비율 [%]로 표현한 것이다.

그 결과 식은 다음 (12) 식으로 표현된다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A \log_{10} Re + B \quad \dots \dots \dots (12)$$

이때 A 와 B는 상수로서 A = -7.79×10, B = 5.60×10²이다. 이식은 원형관내의 공기 흐름에 따른 Vs의 상승율을 표현하는 식으로 오차가 평균 2.79[%]로서 공학적으로 가치있는 식이라고 사료된다.

5. 結論

본 연구는 直圓筒管内 室内空氣가 流動할때 氣體放電 이론과 流體力學 理論을 적용하여 Re에 따른 放電路 姿態의 변화를 설명하고 流動時의 全路破壞 電壓의 변화를 解析하므로 각전극간 거리에서 적용 가능한 식을 도출하여 공학적으로 가치있는 식을 유도하였다. 또한 유속이 2[m/s]이고, 극간거리 1[cm]일때 (-)직류전압(14.5 [kV])을 인가하여 전로파괴를 유지시키고 Re만 변화시켜 갈 때의 방전형식의 변화 pattern을 조사하였다.

본 연구의 중요한 결론은 다음과 같다.

- 1). Re의 조정으로 流動 gas의 방전형식을 제어할 수 있다.
- 2). 전압상승은 低 Re 영역에서 가장 크며, 中 Re 영역에서는 그 상승이 점점 낮아지고 高 Re 영역에서는 거의 포화된다.

3). 전압상승률의 관계는 다음식으로 표현된다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A \log_{10} Re + B$$

A = -7.79×10, B = 5.60×10²의 값을 갖는 상수이다.

- 4). 전로파괴시 corona에 의하여 생성된 전하가 유속분포에 준하여 하류로 분포되므로 전로파괴는 유속분포에 준하여 형성된다.
- 5). 유동시의 최대 불꽃방전 전압이 정지시 보다 평균 d=1 [cm] 일 때 3.1[kV], d=2[cm] 일 때 5.4[kV], d=3[cm] 일 때 8.1[kV] 높게 나타났다.
- 6). Re의 증가에 따라 방전지속시간이 짧아진다.

참 고 문 헌

- 1). KERI, A study on the major Technologies for the Development of Next ultra High voltage electric Apparatus, 1989. 5
- 2). 鳥山 四男 外, 放電ハンドブック, 電氣學會, 昭和 55,
- 3). K.Takaki, H.Akiyama and S.Maeda, Characteristics of Discharge for a Point to Plane Gap in Gas Flow, Trans. IEE Japan, Vol.110-A, No.2, pp.119-125, 1990
- 4). Y.Sekiya, T.Hosokawa and K.haseba, Characteristics of Electric Discharge in a Negative Point to Plane Gap with High Speed Air Flow Trans. IEE Japan, Vol.107-A, No.6, 1987
- 5). 高城實 外 3人, 平等電界中におけるイオン風速の特性, 電氣學會放電研, ED83-25, 昭和 58
- 6). 石川孝司外 3人, 模擬平行平板電極系定常イオン流場における電界測定, 電氣學會論文誌, 61A20, pp.9-15, 昭和 61
- 7). Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee, A study Sparkover Discharge Characteristics of Flowing Air Stressed by Direct Voltage KIEE, vol.30, No.3, 1987,
- 8). 横山重吉, 水力學, パウー 社, 昭和 51年
- 9). 大久保利外 2人, 總對平行平板電極形電氣集じん装置における流れ場の解析と實驗, 電氣學會論文誌, Vol.106-A, No. 8, Aug, 1986, p.377.
- 10). 平山直道, 流體力學 森北出版(株), 1973, p.137, 181, 190.
- 11). 河 在 賢 : 流體工學の 基礎, 嶺南大學校 出版部, 1983.
- 12). 生井武文 : 流れの力學 Corona publishing Co.LTD. 1978, pp.94-95.
- 13). 原 雅則, 平等電界中に置かれた物體のイオン流による帯電特の測定, 電氣學會論文誌, 55-A24, 昭和 55
- 14). Y.Nishimura, and T.S : Spark duration dependency on Gas Flow in automotive Ignition apparatus, Internal Combustion Engine Vol.17, No.8.
- 15). B. R. Lynch and O. Forish : Corona and Breakdown N₂/SF₆, N₂/O₂ Mixture in Static and Flowing air, Glasgow the institution of Electrical Engineers, 1975
- 16). 李 東 仁, 李 廣 植 : 同軸圓筒電極에서 流動空氣의 放電特性, 大韓電氣學會 放電 및 高電壓 研究發表論文, 第 15回, pp. 19-21, 1984. 5月.