

# Reynolds Number를 變數로한 流動空氣의 放電特性에 관한 研究

金榮燦\* 李東仁 李廣植 金相球

嶺南大學校 電氣工學科

## Characteristics of Sparkover Discharge in Flowing Air with Reynolds Numbers' Variable

Y.H.KIM D.I.LEE K.S.LEE S.G.KIM

Yeungnam University

Abstract—This paper shows the characteristics of sparkover discharge in flowing air ranging from 0(Reynolds number, Re) to  $10.52 \times 10^4$ (Re). Also, we investigated changes of discharge pattern for constant input power by adjustment of the Re. The important results obtained from this paper are as follows. The maximum sparkover voltage of flowing air are about 6.3[kV] higher than those of static air. The discharge pattern can be controlled by adjustment of the Re.

### 1. 序論

電氣絶緣材料로서 종래에는 液體誘電體가 많이 사용되어 왔으나 최근 電力需要의 증대로 인하여 계통이 高電壓化 되므로 絶緣性이 우수하고 輕量인 氣體誘電體가 高電壓機器의 絶緣物로서 많이 사용되고 있다.

靜止狀態에 있는 氣體誘電體의 Arc의 消弧性보다 流動時의 소호 능력이 더욱 우수하므로 최근에는 流動狀態의 기체 유전체의 특성 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 또한 유동상태의 放電을 응용한 측면으로 보면 EFD發電(electro fluid dynamics generation), 정전 도장장치(electrostatic powder coating), 오존 발생기(ozone generator), 전기 집진장치(electric precipitator) 및 Air Blast Circuit Breaker(ABB) 등에 널리 응용되고 있다.

공기가 유동함으로써 방전에 미치는 영향에 관해서는, 1966년 K. J. Nygaard가 유동공기에 따른 trichel pulse의 주파수 변화에 대해서 연구한 이래로, 1986년부터 關谷, 高木등이 기류에 의해 공간전하를 유도적으로 변화시켰을 때의 방전모 및 전압의 변화와 corona 빙진 그리고 放電勵起形 氣體Laser에 응용 가능성에 대해서 활발히 연구하고 있다(3-5). 그러나 국내에서는 유동기체의 방전특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다

이러한 관점에서 본 研究는 유동에 따른 全路破壞 전압의 상승 관계를 연구할 목적으로 流體力學의인 理論을 적용하여 Reynold數와 空氣의 全路破壞電壓, Reynold數와 全路破壞時의 放電路 모양과의 관계를 연구하고, 또한 Reynold수의 조정에 의하여 공

기의 放電形式의 制御에 관한 연구를 위하여 放電初期의 전압, 전류를 일정시키고 Reynold數를 변화시켜 갈때 放電形式의 變化 Pattern을 연구하여 이 결과를 응용하면 방전관의 방전형식을 제어할 수 있으므로 조명광원의 제어에도 응용가능하리라 본다.

### II. 流速分佈式

평평한 水平直圓筒管内에 非壓縮性 粘性流體가 흐를 경우 관입구에서 助走距離 이후에서는 관의 전단면에 걸친 速度分佈, 管摩擦에 의한 壓力 손실의 比率 및 관단면을 지나는 유체의 운동에너지는 일정한 상태가 된다.(15,16)

위와 같은 경우 層流의 영역에서 연속의 식은 다음식(1)과 같으며

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

外力이 없을 경우의 Navier-Stokes식은

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

(2)와 같다. 위의 식(1), (2)에서 층류에서의 유속식(3)을 얻을 수 있으며, 또한 최대유속과 평균유속과의 관계식(4)을 얻을 수 있다.

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

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

다음은 亂流에서의 유속분포적인 Nikuradse의 식(9) 즉 식(5)을 이용하여  $U_{mean}$ 과  $U_{max}$ 와의 관계를 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$U = U_{max} - 2.5 \sqrt{\frac{r_0}{\rho}} \ln \frac{r_0}{r_0 - r} \quad \dots (5)$$

$$U_{mean} = \frac{1}{1+1.326 \sqrt{\lambda}} U_{max} \quad \dots (6)$$

위와 같이 하여 난류분포식은 식(7)과 같이 되며 관마찰계수는  $Re \leq 10^5$  인 범위에서는 Blasius식 즉 (8)식,  $Re > 10^5$ 인 범위에서는 Nikuradse식 즉 식(9) 및  $Re$ 의 식은 식(10)을 이용하였다. (6)

$$U = (1+1.326 \sqrt{\lambda}) U_{mean} - 5.75 \sqrt{\frac{U_{mean}}{8}} \quad \dots (7)$$

$$\log_{10} \frac{r_0}{r_0 - r} \quad \dots (7)$$

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad \dots (8)$$

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237} \quad \dots (9)$$

$$Re = \frac{U_{mean} \cdot 2r_0}{\nu} \quad \dots (10)$$

최대유속과 평균유속의 비를  $Re$ 에 따라 도시하면 그림1의 실선으로 표현 되는데 層流에서는 0.5이고 전이역을 지나서 亂流일 때는 증가되어 0.87정도로 된다. 위의 결과로 유속 분포의 전형적 유형은 그림1의 A), B), 및 C)형으로 나타난다.

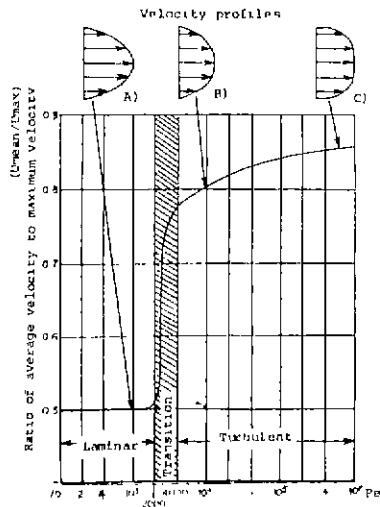


Fig. 1. Ratio of average to maximum(center line)

velocity versus  $Re$  for smooth pipe

## II. 實驗裝置 및 方法

### 1. 實驗裝置

그림2에 본 실험을 위한 裝置의 配圖를 나타 내었다. 실험에 사용된 전원은 (-)직류고압 발생장치(입력전압 110[V], 60[Hz], 출력전압 60[kV], Hitronics inc.)를 사용 하였다. 直圓流管은 두 명 아크릴 원통(內徑 5.3 [cm], 外徑 5.9[cm], 길이 536.4[cm])이다. 또한 流動氣體는 室內空氣( 온도 20-30[°C], 습도 80-85 [%], 기압 757-779[mmHg])를 유동 시켰다.

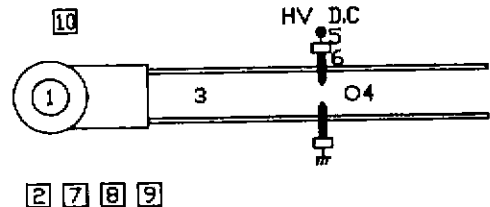
전극은 針電極으로서 길이 10[cm], 직경 0.5 [cm], 첨단부 예각 15[°], 曲率半徑 1.35  $\cdot 10^{-2}$ [cm]의 黃銅製 전극으로서 상류에서 조주거리 이후인 290.1[cm] 떨어진 지점에 원통관의 직경속에 배치 하였다.

### 2. 實驗方法

전극간 거리(d)를 1.2, 3[cm]로 하여 각마다 流速을 0-30[m/sec] 까지 변화시켜 가면서 전로파괴전압과 空氣의 평균유속과의 관계를 측정 하였으며, 측정치는 4회 측정하여 평균값을 취했다. 그리고 전로파괴 전압은 전압을 3[kV/sec]로 상승시켜갈때 전로파괴가 일어나 전원이 자동 차단 될때의 전압이다.

또한 Reynold數가 같으면 유체 흐름장의 力學的 現象이 동일하므로 본 연구에서는 유속을 (10)식을 이용하여 Reynold數로 변형하여, 諸特性을 Reynold數와의 관계로 바꾸어 검토 하였다.

다음은 전극간 거리를 1[cm]로 하여 초기전류, 전압을 일정하게 하고, Reynold수를 증가 시키면서 전로파괴의 소호특성을 관찰 하였다.



1. Blower 2. Voltage regulator 3. Circular duct  
4. Velocity measurement hole 5. Micrometer  
6. Needle electrode 7. Manometer 8. S.T.O  
9. Digital kilovoltmeter 10. D.C high voltage source

Fig. 2. Arrangement of experimental devices

## IV. 結果 및 檢討

유속에 따른 Reynold數와 전로파괴전압( $V_s$ )의 특성은 그림3과 같다. 각전극간 거리에서 전압 上昇率은 다르나 낮은  $Re$ 영역( $Re = 0-Re_c < 10^4$ )에서는 전압 上昇率이 크며 그 이상에서는 전압 상승율이 완만한 후 거의 포화되는 경향이다. 그 결과 유동시의 최대 전로파괴전압은 정지시보다 평균 6.3[kV]높게 나타났다.

낮은  $Re$ 영역에서는 전압상승율이 크게 나타 나는데 이것은 Ion 썸이 하류로 전이 되므로 하류의 電界가 강화된 결과 방전포기 유속분포에 준하여 하류로 형성된다. (1, 2) 그 결과 방전포의 길이 伸張 되어 亂流와의 접촉 면적이 증대 되므로 방전포의 냉각이 촉진되는 현상, 그리고 기류에 의한 전극의 冷却作用에 기인한 것으로 사료된다. (3)

니뮴은  $V_s$ 가 포화되는 영역인데 이 영역의 전로파괴 지속 시간은 거의 같게 나타나며 全路破壞路의 모양도 유사하게 형성된다. 이차간이 전로파괴 지속 시간이 거의 같고, 또한 전로파괴로 이 모양이 유사하다는 것은  $V_s$ 와 같이 거의 동일하게 나타남을 입증하여 준다.

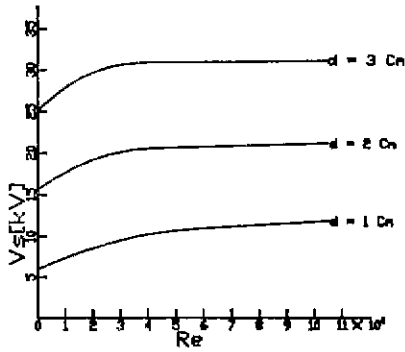


Fig. 3. Sparkover discharge voltage versus Reynolds number

다음은 Re의 변화에 따라 방전형식의 변화 pattern을 조사하여  $V_s$ 의 상승관계를 더욱 명확히 究明하고 入力電力이 일정할때 Re에 따라 방전형식의 변화 pattern을 알아보기 위하여 全路破壊조기이 전류, 전압을 일정하게 유지시켜 놓고 Re를 변화 시켰을 때 방전형식의 변화 pattern을 그림4에 나타내었다.

$I_a$ 를 증가시키면 초기전류가 낮음때(0.45mA, 1.5mA)는 방전형식이 변화(pattern) 그림4에서 보여주는 바와 같이 pattern I로 표현 가능하다. 방전로 모양이 III의 경우에는 전로파리와 코로나 상태인 III-I과 III-II가 교번하여 발생한다. 방전로 모양이 III-II, IV의 경우에는 접지속 전극에서 생성된 glow corona가 기류에 따라 하류로 흐르는 모양을 한다.

이것은 방전시에 생성된 負의 空間電荷가 기류에 의하여 하류로 이동하여 접지속 전극주위의 전계를 강화시킨 결과이다.

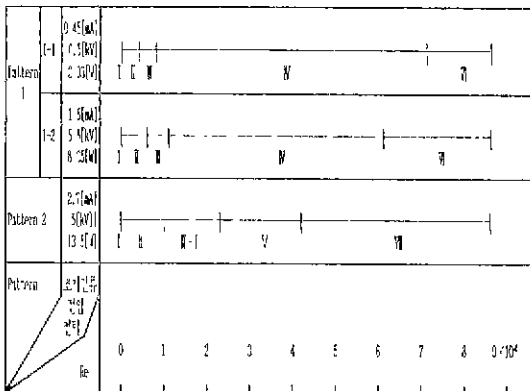


Fig.4. Changes of pattern for constant input power

이때 III-II의 corona pulse는 사진1과 같이 trichel pulse로 전이하는 과정의 pulse가 나타난다. VI의 경우는 접지부 corona발생부와 (-)전극의 발광부기 시작점으로 교착된 형태의 corona를 유지하며 전류 pulse는 안정된 trichel pulse를 이룬다.

그리고 초기전류가 큰 경우(2.7mA)에는 pattern 2 로서 변화 되는데, III의 경우는 III-II는 나타나지 않고 III-I의 방전형태만 나타난다. V와 VI-II는 glow corona 형태로서 pulseless corona이다. VII의 경우에는 VI-I과 VI-II의 형태가 교번되어

간헐적인 전로파리가 일어난다. 이때는 전술한 것과 같이 Re를 증대시키면 전극주위에 역류현상이 일어나 공간전하가 전극주위로 운집하여 이곳이 전계가 강화되기 때문이다.

그림4의 특징은 초기전류가 클수록 corona가 시작되는 Re는 높게 되며, 또한 corona가 유지되는 Re의 범위가 좁아지게 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 위에서 기술한 바와 같이 Re가 증대되면 방전로 및 전극의 냉각이 증대되어 전로파리의 억제현상으로 볼 수 있다. 그러므로 입력전력이 클 때는 corona발생 영역이 좁아진 결과로 나타난다. 또한 유동가스 중에서 발생하는 과도 arc의 복잡한 손실기구인 에너지 평형의 일반식으로도 설명 가능하다. [9].

$$\begin{aligned}
 & (\text{保有熱量}) + (\text{半徑方向으로의 對流損}) + (\text{軸方向으로의 對流損}) \\
 & + (\text{廢氣冷卻損}) + (\text{分子 擴散損}) + (\text{亂流 擴散損}) + (\text{放射損}) \\
 & = (\text{電氣的 入力})
 \end{aligned}$$

위의 식을 간단히 하면, 다음과 같은 동적arc의 에너지 평형식으로 쓸 수 있다.

$$P + \frac{dQ}{dt} = V_a I_a$$

위의 식에서 같은 入力電力에서 Re의 증가에 따라 손실이 증가한 결과, 保有熱量은 상대적으로 감소하게 된다.

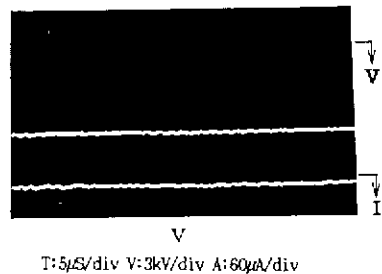
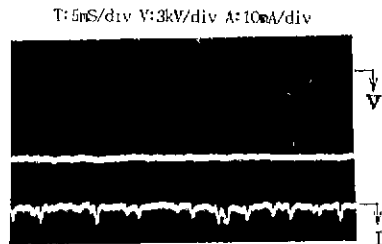
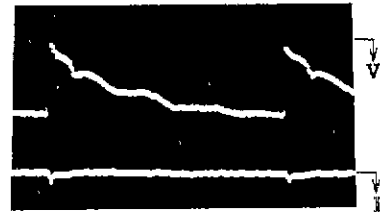


Photo.1. Waveforms of current and voltage for constant input power

보유열량이 감소 한다는 것은 arc가 일어나기 어려운 상태로 된다. 이런 현상이 심하면 심할수록 전토파괴는 corona영역으로移行하기 쉽게 된다. 그 결과 그림4에서와 같이, pattern 1-1과 1-2를 비교하여 보면, 초기 입력전력이 큰 1-2가 corona영역폭이 좁게 나타난다. 또한 pattern 1과 2를 비교하여 보면, pattern 2가 입력전력이 더 큰 결과 corona영역의 폭이 더욱더 좁게 나타남을 알 수 있다. 이 결과를 보면 Re의 조정에 의하여 氣體의 放電形式을 제어할수 있음을 알수있다.

그림5은 Re가  $0.7 \times 10^4 \sim 10.52 \times 10^4$ 까지의 각 d를 파라메타로한 전압 상승율관계이다. 여기서 上昇率은 각 d에서 첫구간 즉  $Re=0.7 \times 10^4$ 에 대한 Vs의 상승율을 100[%]로 하고 이에 대한 각 구간의 상승율의 백분율을 [%]  $V_s/Re$ 로 나타내었다.

그 특성은 그림5과 같이 지수적으로 감소한다. 이를 수식화하면 (11)식과 같이 된다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A + B e^{C \cdot Re} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$A = 10.2$$

$$B = 125$$

$$C = -4.66 \times 10^{-6}$$

이 식은 본 연구의 각 d에 대한 유동시의 Vs 상승관계를 대표하는 식으로 오차는 5.7[%] 정도로서, 원형관내의 공기흐름에 따른  $V_s$ 의 상승율을 표현 하는 식으로서 공학적으로 가치있는 식으로 사료된다.

V. 結 論

직원통관내 공기가 유동할때 氣의 直流放電特性을 유속분포에 직접 관계가 있는 Reynold 數와의 관계를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Reynold 數가  $4 \times 10^4$  이내에서 全路破壤電壓의 上昇率이 크며 그 후로는 완만한 경향을 거쳐 거의 포화되며 全路破壤電壓은 流體加속가 정지시보다 平均 6.3[kv] 높았다.
- 2) 전압 上昇率의 관계는 다음 식으로 나타낼수 있다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A + B e^{C \cdot Re}$$

$$A = 10.2$$

$$B = 125$$

$$C = -4.66 \times 10^{-6}$$

- 3) 초기입력전력을 일정하게 하고 전토파괴를 유지시킨후 Re를 변화시킨 결과, 초기입력 전력이 적을수록 corona방전 지속 시간이 길다.
- 4) Reynold수의 조정으로 氣體의 放電形式의 制御가 가능하다.
- 5) 4)의 결과를 응용하면 방전관의 광원제어에 應用가능할 것으로 판단됨.

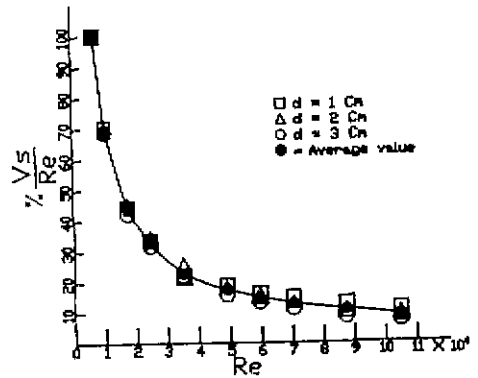


Fig. 5.  $\frac{V_s}{Re}$  versus Reynolds number

記 號 說 名

- $V_s$ : 전토파괴전압 Re: Reynolds number
- x, y, z: x축을 공기흐름 방향으로 취한 직각좌표
- U, V, W: x, y, z에 있어서 속도성분
- $U_{max}$ : 최대 공기 유속 P: 유로내 압력
- $\bar{u}_{mean}$ : 평균 공기 유속
- l: 원통관과 同軸인 가상유체 원주길이
- $\rho$ : 공기밀도
- $\nu$ : 동전계수
- $\mu$ : 점성계수
- $\lambda$ : 관마찰계수
- r: 가상 원주의 반경
- ro: 관의 반경
- $\tau_0$ : 전단응력
- d: 전구간 거리
- $\Delta P$ : l의 일부단면과 하부단면 사이의 압력차
- t: 전토파괴 지속 시간
- Q: arc 보유열량
- P: 손실의 총합
- $V_A$ : arc 전압
- $I_A$ : arc 전류
- $\frac{dQ}{dt}$ : 보유열량의 초당변화량
- dl

參 考 文 獻

- 1) 原 雅則: 電氣學會 論文誌 55-A24 昭和 55
- 2) K.J.Nygard: Journal of Applied Physics Vol 37 No.7 1966.
- 3) K.Takaki, H.Akiyama, S.Maeda: T.IEE Japan, Vol.110-4, No.2(1990)
- 4) M.Ahkl-Salam: IEE Transaction on electrical insulation Vol.EI-72 No.6(1987)
- 5) Y.Sekiya, T.Hosokawa, K.Haseba: T.IEE Japan, Vol.107 -A, No.6(1987)
- 6) 平山道徳 "流體力學" 森北 出版 (1973)
- 7) 横山重吉 "水力學" パウ-社 (昭和 51年)
- 8) Kwang-Sik Lee, Report of Institute of Industrial Technology Yeungnam University, Vol.12, No.1 PP.161~166(1984)
- 9) Swanson, B.W, Rnit, R.M, & Browne, T.E : IEEE, Vol. PAS69, No.8, p.2033(1970)