

# 불평등 전기에 있어서 流動 氣의 放電特性

송 현 직, 김 상 구, 윤 영 대, 이 광 식, 이 동 인  
영남대학교 공과대학 전기공학과

## The discharge characteristics in flowing gas under the nonuniform field

Hyun - Jig Song, Sang - Ku Kim, Young - Dae Youn, Kwang - Sik Lee, Dong - In Lee  
Dep. of Electrical Eng. Yeungnam University

### Abstract

This paper shows the discharge characteristics in flowing air with variation of temperature(T) under the needle-needle gap.

Flowing air duct of this investigation is circular tube. The flow at the experimental position's section is described as fully developed laminar flow.

The important results obtained from this study are as follows. The ratio sparkover voltages to the Reynolds number(Re) increases with decreasing the Re.

The velocity profiles can be visualized by this experimental method. The breakdown voltage ( $V_{s1}$ ) for variation of T at 1[m/s] can be expressed by  $V_{s1} = K_1(23.98\rho d + 6.98\sqrt{\rho d})$ [kV].

### 1. 서론

최근 전력수요의 증가로 인한 계통의 高電壓, 大容量化로 系統과 연계되는 차단기류 뿐만 아니라 변압기 등에서도 高電壓, 大容量化가 요구되고 있는 현시점에서 電氣의 絶緣特性이 우수한 氣體誘電體(Air, N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub> 등)가 이용되고 있다.

이와 같이 계통이 高電壓, 大容量化함에 따라 필수적으로 수반되는 것이 각종 전기기기의 절연 및 차단계통의 신뢰도 향상이며, 또한 지금까지 많은 과학자에 의해 정지시 Gas의 放電特性에 관한 解析은 많은 진전을 보아 왔으나, GBB(Gas Blast circuit Breaker)와 같은 실제계통에서의 流動 Gas의 放電特性에 대한 연구는 아직까지 미흡하여 연구할 과제가 많이 남아있는 실정이다. 특히 流動 Gas를 이용하고 있는 여러 응용분야에서의 Gas매체는 항상 주위환경에 따라서 그 온도변화 현상을 수반하고 있으므로, 그 방전특성의 온도 의존성에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. [1]

또한 전기 집진장치는 Gas의 온도 및 유속에 큰 영향을 미치고 있으며, 오존 발생기 또한 원료 Gas의 온도, 유속 및 압력 등에 많은 영향을 가져오고 있다.

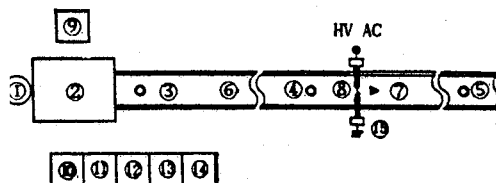
따라서 본 연구는 對稱의 불평등 전기에 있어서 交流 電壓 인가시 정지상태 및 流動 Gas의 온도변화에 따른 全路 破壞電壓 特性을 연구할 목적으로 기체방전 이론과 유체역학 이론을 적용하여 온도, 전극간 거리 및 Reynolds number (Re)의 변화에 의한 공기의 全路破壞전압과 全路破壞시의 방전도 모양과의 관계를 연구하고자 한다.

### 2. 유체 분포 이론

방전 및 고전압 공학 연구회(1992, 4, 10) 논문지 참조 (pp 40 ~ 41)

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 실험장치



- ①Blower ②Heater ③, ④, ⑤Thermometer ⑥Circular duct
- ⑦Velocity measurement hole ⑧Needle electrodes ⑨AC High voltage source ⑩Digital kilovoltmeter ⑪Manometer ⑫Thermal controller ⑬High voltage probe ⑭Anemometer ⑮Micrometer

그림 1. 실험장치의 배치도  
Fig. 1. Experimental Device

그림 1은 본 실험의 배치도를 나타낸 것으로써 사용된 전원장치는 입력전압 : 110[V] 60[Hz], 출력전압 : AC 50[kV]의 Hipotronics사 제품을 이용하였으며 고전압 발생장치에서 출력되는 전압을 High Voltage Probe (分壓比 2000 : 1, 오차 Full Scale  $\pm 1\%$ )를 이용하여 Digital Kilovoltmeter로 정확히 측정하였다.

직원통관의 관측부는 Pyrex Glass제의 원통관 (내경 5.0[cm], 외경 5.2[cm], 길이 30[cm])을 사용하여 방전도 관측이 용이하도록 하였다.

또한 직원통관의 총길이는 350[cm]이며, 流動空氣는 실내공기 (온도 18.5  $\pm$  2 [°C], 기압 757[mmHg], 습도 60  $\pm$  1[%])를 유동시켰으며, 유속은 Blower로 1~15[m/s]로 변화 가능하게 하였다.

또한 流動空氣의 온도변화 (30 ~ 200[°C])를 위하여 Heater (220[V], 10[kW])에 전압제어 방식인 Thyristor Unit (220[V], 60[A])를 장착하여 주조거리 250[cm] 위치에

Thermocouple( 그림 1의 ④ )로 전극으로부터 상류방향 8 [cm] 떨어진 지점의 온도를 Sensing하여 자동조절 기능을 가지도록 하였다.

기타 사용된 기기들은 그림 1과 같다.

또한 전극은 침전극으로써 길이 10[cm], 직경 0.5[cm], 첨단부 예각 30 [°]인 탄소공구강 ( Carbon Tool Steel ; 경도 : 215, C : 1.32, Si : 0.32, Mn : 0.48, P : 0.1, S : 0.1 ) 전극으로써 상류에서 공기의 흐름과 수직이 되도록 助走距離이후인 258[cm] (  $r_0 \times 100$  ) 위치에 원통관의 직경축에 수평 배치하였다.

### 3-2. 실험방법

전극간 거리(d)를 2, 3[cm]로 하여 각 d마다 유속을 1 ~ 15[m/s], 온도를 30[°C], 60[°C], 120[°C], 180[°C], 200[°C]로 변화시켜 가면서 온도와 유속의 변화에 따른 전로파괴시의 전압상승 관계를 測定하였다.

한편 Reynolds number(Re)가 같으면 유체 흐름장의 역학적 현상이 동일하므로 流動 Gas의 흐름상태와 放電現象과의 관계를 검토하기 위하여 유속을 Re로 변환하여 검토하였다.

전로파괴 전압은 3[kV/s]로 상승시켜갈 때 전로파괴가 일어나 전원이 자동 차단될 때의 전압이며, 측정치는 5회 측정하여 산술 평균한 것이다.

전극은 오염방지를 위해 每 80회 실험한 후 전극 단부 표면을 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 연마하고 무명천으로 깨끗이 닦은 다음 실험을 하였고 동실험에서 사용된 유속측정기는 Kanomax사의 Anemomaster( Model : 6161 )를 이용하였다.

## 4. 결과 및 검토

전극간 거리(d)를 2, 3[cm]로 하여 온도 ( 30[°C], 60[°C], 120[°C], 180[°C], 200[°C] )를 매개변수로 하였을 경우, Re와 전로파괴전압과의 관계를 검토하였는데 그 결과는 그림 2 및 그림 3과 같은 특성으로 나타났다. 그림 2는 d = 2[cm]인 경우이고 그림 3은 d = 3[cm]인 경우이다.

그림 2, 3에서 d가 증가함에 따라서 V<sub>s</sub>가 상승하는 것은 流動時에도 静止時와 같은 유형으로 流動時의 최대 전로파괴전압은 静止時보다 평균적으로 30[°C] : 3.8[kV], 60[°C] : 3.6[kV], 120[°C] : 3.9[kV], 180 [°C] : 4.2[kV], 200 [°C] : 4.3[kV] 높게 나타났다.

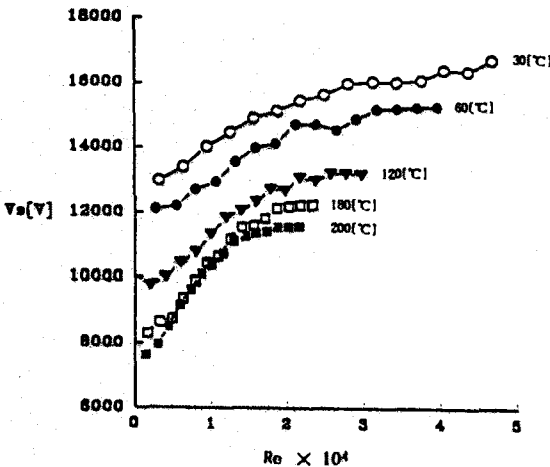


그림 2. V<sub>s</sub>와 Re와의 관계 ( d = 2[cm] )

Fig. 2. Relation of V<sub>s</sub> versus Re ( d = 2[cm] )

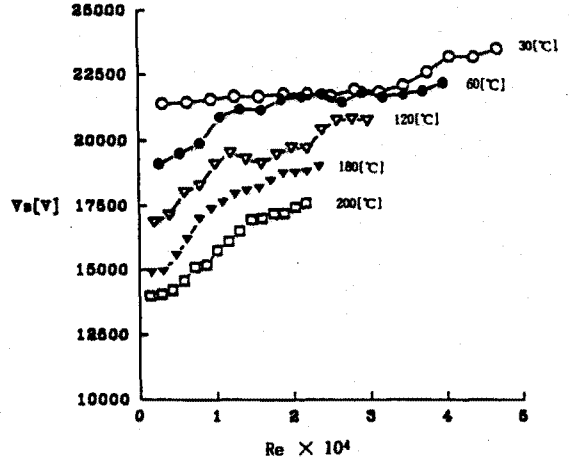


그림 3. V<sub>s</sub>와 Re와의 관계 ( d = 3[cm] )

Fig. 3. Relation of V<sub>s</sub> versus Re ( d = 3[cm] )

또한 각 d에서 전반적으로 저 Re영역에서는 전압상승율이 크며 중 Re영역에서는 거의 완만한 후 고 Re영역에서는 포화되는 경향이다.

이와 같이 저 Re영역에서 전압상승율이 큰 것은 다음과 같이 설명할 수가 있다. 즉 전로파괴는 Corona에 의해서 생성하는 전하분포에 큰 영향을 받게 되는데, 이러한 저 Re영역에서는 유속분포의 변화가 심한 영역으로 Corona에 의해 생성한 전하분포 또한 이에 준하여 큰 변화를 가져온다. (5.7) 그 결과 방전로의 양상도 큰 변화를 가져오는데 이것은 유속분포에 준하는 ion風이 하류로 편이되므로 하류의 전계가 강화된 결과 방전로의 길이가 신장되고 기류와의 접촉면적이 증대되어 방전로 냉각의 촉진 및 전극의 냉각작용에 기인한 것이다.

한편 중 Re영역을 거쳐 고 Re영역으로 갈수록 방전로의 변화가 점점 줄어들는데 이것은 이 영역의 Re에서는 유속의 분포가 거의 일정한 모양을 하기 때문이다. 그 결과 고 Re영역에서는 전압상승율이 포화되는 경향으로 나타난다.

이들 관계를 더욱 명확히 밝히기 위하여 전극간 거리(d)를 2[cm]로 하고 온도가 30[°C]일 경우, Re변화에 따른 방전로 모양을 관측한 것이 사진 1이다.

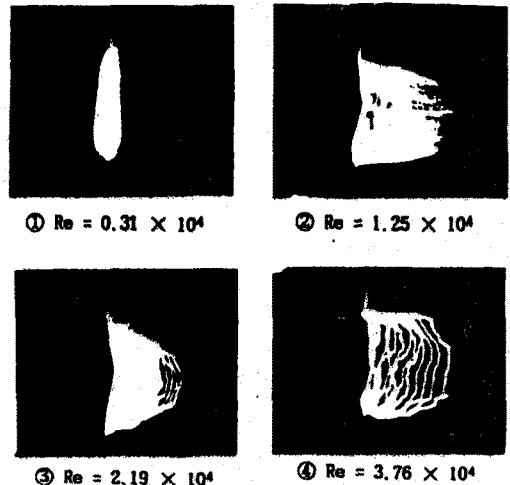


사진 1. 전로파괴시의 방전로  
Photo.1. Sparkover discharge path

여기서 보면 저 Re영역에서는 사진 1의 ①, ②, ③과 같이 방전로 양상이 큰 변화를 가져오는데, 前述한 바와 같이 corona에 의해서 발생하는 전하분포가 이와 같은 저 Re영역에서는 前報에 기술한 바와 같이 유속분포의 변화가 심한 영역이다. 이 영역에서는 corona에 의해 발생한 전하분포 또한 이에 준하여 큰 변화를 가져오게 된다. 그 결과 방전로의 양상도 유속분포에 준하여 형성된 결과 사진과 같이 저 Re영역에서는 큰 변화를 보여준다.

또한 Re를 증가시켜 갈수록 방전로의 변화가 점점 줄어들어 고 Re영역에서는 사진 1의 ④와 같은 방전로를 계속 유지하게 되는데 이렇게 방전로 모양이 일정하게 유지된다는 것은  $V_s$ 가 포화되는 결과로 나타난다.

또한 각 d에서 온도변화에 따른 전압상승율은 다르게 나타났다. 30[°C], 60[°C]에서는 전압상승율이 완만하며 온도가 높아질수록(120 → 180 → 200[°C]) 비교적 저 Re영역에서는 전압상승율이 높게 나타났으며, 그 이상에서는 점차로 완화된 후 거의 포화되는 경향이 나타났다. 즉 온도가 높을수록(30 → 60 → 120 → 180 → 200[°C]) Arc의 초당 보유열량이 증대되어 Re증가에 따른 에너지 손실에 의한 냉각효과의 상대적인 저하로 인하여 전압상승율이 점차로 완만한 후  $V_s$ 가 포화되는 경향으로 나타난 결과이다.

반대로 온도가 낮을수록(200 → 180 → 120 → 60 → 30[°C]) 어느 일정한 유속에서 초기 전류값의 감소로 인한 Arc의 초당 보유열량이 감소되고, 온도가 높을 때보다 낮을수록 냉각효과가 증대되므로 그림 2, 3과 같이  $V_s$ 도 온도가 낮을수록 높게 나타났다.

또한 그림 2, 3에서 가장 최저 유속인 1[m/s]에서 각 d의 경우, 온도변화에 따른  $V_{s1}$ 의 상승관계를 다음 식(1)로 표현할 수 있으며, 이 식에서 온도가 높아지면 相對空氣密度( $\rho$ )가 작아지므로 낮은 전압에서 전로파괴가 발생하여  $V_{s1}$ 가 강하함을 알 수 있다. [8]

$$V_{s1} = K_1 ( 23.98 \rho d + 6.89 \sqrt{\rho d} ) \text{ [kV]} \quad (1)$$

여기서  $\rho$  : 20[°C]의 공기에 대한 相對空氣密度  
= 0.38 P / (  $t_1 + 237$  )

P : 氣壓 [mmHg]      d : gap의 길이 [cm]  
 $t_1$  : 溫度 [°C]       $K_1$  : 불평등계수

이 식은 평등 전계에서  $V_{s1}$ 에 관한 식을 응용하여 본 실험과 같은 針對針의 불평등 전계에서도 사용 가능하게 하기 위하여 불평등 계수  $K_1$ 을 곱한 형태로 구성하였으며 그 값과 계산값과 실험값의 平均誤差는 표 1과 같다.

표 1. 불평등 계수와 오차  
Table. 1. Nouniform factor and Error

전극간 거리(d)[cm]	불평등계수( $K_1$ )	오차( $\times 10^{-3}$ [%])
2	0.204	6.5
3	0.242	4.9

## 5. 결론

침대침 전극의 불평등 전계에서 직원공간내 공기의 온도, 유속 및 전극간 거리(d)를 변화시킬 경우 AC 放電特性을 기체방전 이론과 유체역학 이론을 적용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정지상태에 가까운 최저 유속(1[m/s])시 각 d의 경우, 온도변화에 따른 全路破壞電壓( $V_{s1}$ )은 다음 식으로 표현된다.

$$V_{s1} = K_1 ( 23.98 \rho d + 6.89 \sqrt{\rho d} ) \text{ [kV]}$$

여기서

$\rho$  : 20[°C]의 공기에 대한 相對空氣密度  
= 0.38 P / (  $t_1 + 237$  )

P : 氣壓 [mmHg]

$t_1$  : 溫度 [°C]

d : gap의 길이 [cm]

2) 流動時의 최대 전로파괴전압은 정지시보다 평균적으로 30[°C] : 3.8[kV], 60[°C] : 3.6[kV], 120[°C] : 3.9[kV], 180[°C] : 4.2[kV], 200[°C] : 4.3[kV] 높게 나타났다.

3) 全路破壞시 ion풍이 유속분포에 준하여 하류로 분포되므로 전로파괴가 이에 준하여 형성되며 전로파괴로의 변화가 심한 Re영역에서는 전압상승율이 큼을 알 수 있다.

4) 고 Re영역에서는 유속분포가 균일하게 형성되므로 ion風의 분포가 그에 준하여 일정한 모양을 한 결과 전로파괴전압이 포화된 결과로 나타났다.

5) Re에 대한  $V_s$ 의 상승율은 Re가 감소함에 따라 증가한다.

6) 본 실험을 통하여 방전로를 가시화할 수 있었다.

위의 결과를 응용하여 유동 Gas를 이용하고 있는 여러 應用분야의 온도 의존성에 대한 방전특성 연구에 좋은 자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 1) 平山直道, "流體力學", 森北 出版, 1973
- 2) 橫山重吉, "水力學", パウ-社, 昭和 51
- 3) M.Kawasaki and M.Akazaki, "Experimental Study of Reactive Force Action on Needle Electrode due to Ionic Wind in Needle to Mesh Plane Electrodes", Trans. of IEE Japan, 59-A52, pp1~8, 1984
- 4) 橋本清 外4人, "針對球電極における イオン風の暴動", 電氣學會九州支部連合大會論文集, pp.229~230, 昭和48
- 5) 原 雅則, "平等電界中に置かれた物體のイオン流による帶電特の測定", 電氣學會 論文誌, 55~A24, 昭和 55
- 6) M.M. Kalifa and R.M. Morris "A Laboratory Study of the Effect of Wind on DC Corona", IEEE Trans. on Power apparatus and system, Vol. PAS-86, No.3, pp. 290~298, 1967
- 7) K.J.Nygaard, "Frequency of Corona Discharge Trichel Pulses in Air Flows", Journal of Applied Physics, Vol 37, No.7, pp.2850~2852, 1966.
- 8) Sang-Gu Kim, "Characteristics of Sparkover Discharge in Flowing Gas with variation of temperature", Proceeding of the Korean Institute of Electrical Engineering, pp 310~313, 1991, 7
- 9) Kwang-Sik Lee, "Discharge Characteristics of Flowing Air in Co-axial Electrode", Report of Institute of Industrial Technology Yeungnam University, Vol. 12, No.1, pp.161-166, 1984