

온도변화를 고려한 유동공기의 방전특성에 관한 연구

김 상구 . 오 재연 . 송 현직 . 이 광식 . 이 동인

Characteristics of Sparkover Discharge In Flowing Air With Variation Of Temperature

(Sang - Ku Kim, Jae - Yel Oh, Hyun - Jig Song, Kwang - Sik Lee, Dong - In Lee)

Yeung Nam University

Abstract

This paper reports the characteristics of sparkover discharge in flowing air with variation of Temperature(T). Also, we studied changes of discharge pattern for constant input power by adjustment of the Reynolds number(Re) and T. The essentials of this paper are as follows.

The invaluable equation obtained from this experiment is

$$V_s \text{ [%]} \frac{1}{Re} = A \cdot \text{LOG}_{10} Re + B$$

where A, B : constant

Breakdown Voltage for variation of temperature at 1[m/s] is given by expression

$$V_s = K(23.98 \mu d + 6.8 \sqrt{\mu d}) \text{ [kV]}$$

where K = 0.331

The discharge pattern can be controlled by adjustment of the Reynolds number

1. 서론

본 연구는 정지 및 유동 공기에 대한 방전 특성에 관한 연구로서 직원통관내에 조주거리 이후지점에 침대 침전극을 수평배치하여 온도(T), 전극간 거리(d), 유속(U)을 변수로 하여 진로파괴전압(V_s), 파시시의 전압, 전류 파형용 측정 및 관찰하였다. 또한 U가 1[m/s]일때 진로파괴를 유지시킨후 U를 증대시켜 가면서 방전현상을 연구 검토 하였는데, U를 변화 시키므로써 방전형식을 제어할 수 있음을 확인하였다.

또한 U를 적당히 조정 하므로써 glow corona를 안정히 유지시킬 수 있었다.

2. 유체이론

유동 gas이론은 시간에 따라서 유속이 일정한 층류영역과 변화가 심한 난류영역이 있으며, 이 둘 두 영역이 공존하는 영역인 천이영역으로 구분 된다.

따라서 층류는 유체입자들이 질서정연하게 유체입자의 층 과 층사이에서 운동량의 변화만 있는 흐름이고, 난류에서는 유체입자들이 아주 심한 불규칙한 운동을 교환하면서 흐르는 상태이다.

일반적으로 원통관의 흐름(pipe flow)은 다음과 같은 관계가 성립한다. [1, 2, 3]

Re ≤ 2300	: 층류
2300 ≤ Re ≤ 4000	: 천이영역
Re ≥ 4000	: 난류

여기서 Re는 Reynolds number 이다.

운행한 수평 직원통관 내에 비압축성 전성유체가 흐름 경우 관입구에서 조주거리 이후에서는 관의 전단면에 걸친 유속분포, 관마찰에 의한 압력손실의 비유 및 관단면을 지나는 유체의 운동 에너지는 일정한 상태가 된다. 이와같은 경우 층류의 영역에서 연속의 식과 Navier-Stokes식을 이용하여 층류의 유속 분포식(U)를 구하면 식(1)과 같으며, 최대유속과 평균유속과의 관계는 (2) 식과 같다.

$$U = U_{max} - \frac{\Delta P}{4\mu L} r^2 \dots\dots\dots (1)$$

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

여기서

L : 원통관과 동축인 가상유체 요소의 길이
r : 가상유체 요소의 반경

ΔP : L의 상하 단면 사이의 압력차

μ : 점성계수

U_{max} : X 방향의 최대유속

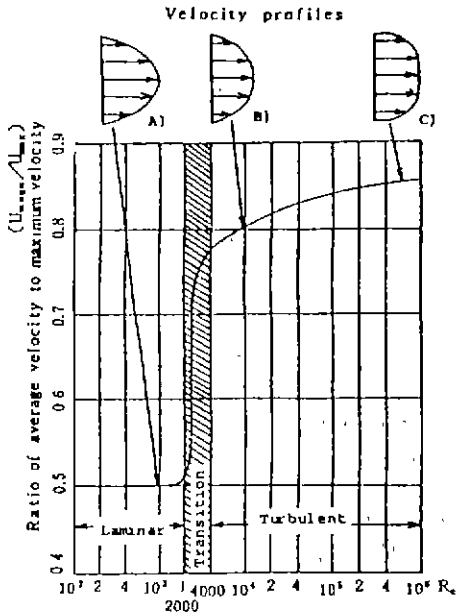
U_{mean} : X 방향의 평균유속.

표1. 온도변화에 따른 Reynold 수

온도 (°C)	유속 (m/s)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
19.5	0.33	0.66	0.99	1.32	1.66	1.99	2.31	2.65
60	0.26	0.53	0.79	1.06	1.32	1.59	1.85	2.12
100	0.21	0.44	0.65	0.87	1.09	1.30	1.52	1.74

난류에서는 Nikuradse의 유속분포식을 이용하였다. [2]

이상의 결과를 이용하여 Re에 따른 $\frac{U_{mean}}{U_{max}}$ 의 비는 그림 1의 실선과 같이 표현되는데 층류에서 느는 0.5이고 천이영역을 지나서 난류일때는 증가되어 0.87정도 된다. 위 결과에 의한 유속분포의 전형적인 유형은 그림 1의 A), B), C)형으로 나타난다.



온도 (°C)	유속 (m/s)						
	9	10	11	12	13	14	15
19.5	2.98	3.31	3.64	3.97	4.31	4.64	4.97
60	2.38	2.65	2.91	3.18	3.44	3.70	3.97
100	1.96	2.17	2.40	2.61	2.83	3.04	3.26

3. 실험장치 및 방법

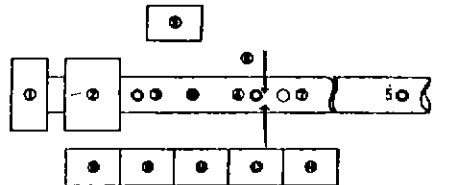


Fig2. Arrangement of experimental devices

그림 1. 원할한 원통관내의 U_{mean}/U_{max} 와의 관계

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

Velocity versus Re for smooth pipe

여기서 Re는 다음(3)식으로 계산 하였다.

$$Re = \frac{U_{mean} \cdot 2r_0}{\nu} \dots \dots \dots (3)$$

여기서 r_0 : 관의 반경

ν : 유체의 동점성 계수

또한 위의 Re의 값은 온도에 따른 동점성 계수를 이용하여 온도변화에 따른 Reynold수를 표1에 나타내었다.

본 실험의 장치도는 그림2와 같고 실험방법은 다음과 같다.

전극간 거리(d)를 0.5, 1.5, 2.5[cm]로 하여 각 전극마다 유속을 1~15[m/s], 온도를 19.5[°C]에서 100[°C]까지 변화 시켜가면서 온도와 유속의 변화에 따른 전도파괴전압과의 관계를 측정하였다. 여기서 전도파괴전압은 전압을 3[kV]로 상승시켜 갈때 전도파괴가 일어나 전원이 자동 차단 될때의 전압이며, 측정치는 5회 측정하여 산술

평균 한 것이다. 한편 Reynold수가 같으면 유체 흐름장의 역학적 현상이 동일 하므로 본 연구에서 유속을 (3)식을 이용하여 Re수로 바꾸어 이 Re로 계류성류 검토 하였다.

전극은 80회 실험후 전극단부 표면을 Al_2O_3 로 연마한 후 무명천으로 깨끗이 닦은 다음 실험을 하였다.

또한 전기적 입력이 일정할 때 방전형식의 변화 Pattern을 연구하고자 $d=1.5[cm]$ 이고 온도가 $60[^\circ C]$ 일때 전로파괴를 유지시켜 놓고 유속을 $1\sim 15 [m/s]$ 로 변환 시켜가면서 이때의 방전로 (SDP) 및 전압, 전류 파형을 관측 하였다. 위의 각 실험마다 전압, 전류 파형 및 전로파괴를 측정 및 촬영하였다.

4. 결과 및 검토

그림 3의 경우, 즉 $d=1.5cm$ 이고 공기온도가 $60[^\circ C]$ 인 경우를 중심으로 설명하여 보고자 한다. 편의상 Re의 영역은 다음과 같이 세영역으로 구분 하였다.

- 저 Re영역 : $0 \leq Re \leq 0.99 \times 10^4$
- 중 Re영역 : $0.99 \times 10^4 \leq Re \leq 1.06 \times 10^4$
- 고 Re영역 : $Re \geq 1.06 \times 10^4$

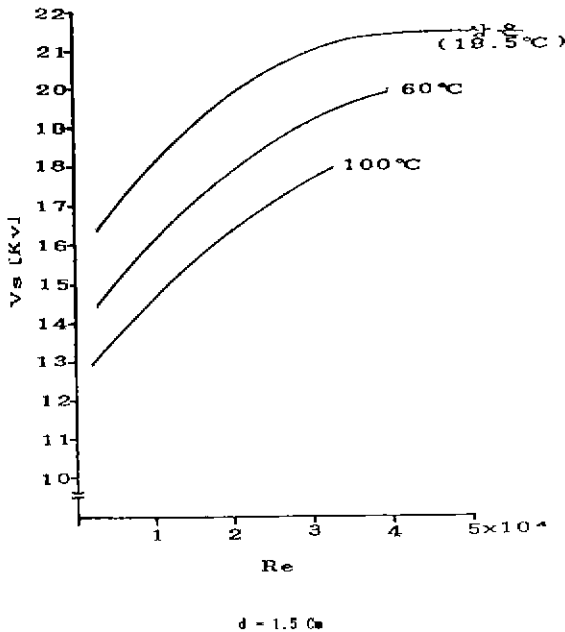


그림3 Re에 따른 전로파괴 전압
Fig 3 Sparkover discharge voltage versus Reynolds number

그림과 같이 저 Re영역에서는 전압상승율이 크며 중 Re영역에서는 거의 완만한 후 고 Re영역에서는 포화되는 경향이다.

이처럼 저 Re영역에서 전압상승율이 큰것은 다음과 같이 설명할수가 있다. 즉 전로피고는 Corona에 의하여 발생하는 전하분포에 큰 영향을 받게 되는데, 이러한 저 Re영역에서는 그림 1과 같이 유속분포의 변화가 심한영역으로 Corona에 의해 발생한 전하분포 또한 이에 준하여 큰 변화를 가져오게 된다(5,6). 그 결과 방전로의 모양도 큰 변화를 가져오는데 이것은 유속분포에 준하는 Ion풍이 하류로 편이되므로 하류의 전계가 강화된 결과 방전로의 길이가 신장되고 기류와의 접촉면적이 증가되어 방전로의 냉각의 촉진 및 전극의 냉각작용에 기인한 것으로 사료된다.

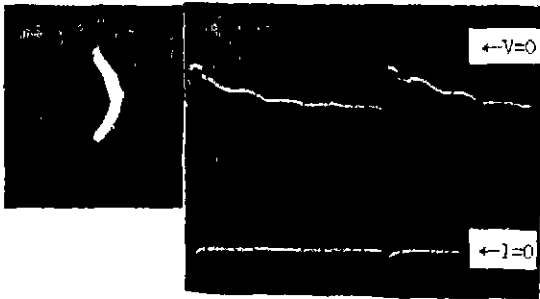
또한 중 Re영역을 거쳐 고 Re영역으로 갈수록 방전로의 변화는 점점 줄어든다. 중 Re영역과 고 Re영역의 경계인 $Re=1.32 \times 10^4$ 부터는 그림 1의 B)와 C) 중간형태의 방전로를 계속 유지한다. (DHP참조) 이렇게 방전로 모양이 같게 유지된다는 것은 전로파괴전압(V_0)이 포화된 결과로 나타난다.

한편 이러한 상승관계를 더욱 명확히 하기 위해 $d=1.5[cm]$ 에서 공기온도는 $60[^\circ C]$ 로 유지시켜며, 12[kV]의 전압을 인가하여 전로파괴를 지속시켜 놓고 Re만 변화시켜 갔을 때 방전로 및 전압, 전류파형을 관측한 결과 사진 1과 같다.

여기서 보면 저 Re에서는 사진 a), b), c)와 같이 방전로는 큰 변화를 가져오는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같고 중 Re와 고 Re경계인 $Re = 1.06 \times 10^4$ 에서는 사진 d), e)와 같이 전로파괴와 Corona가 교번하는데 이때의 전압, 전류파형도 사진 1의 (4), (5)와 같다. 고 Re에서는 e) 및 (5)와 같이 Corona가 계속 유지된다. 이것은 전기적 입력이 일정할 때 유속이 증대되면 유체의 냉각률이 증대되어 Arc의 초당 보유열량이 감소된 결과 소호작용이 증대된 결과이다. [3]



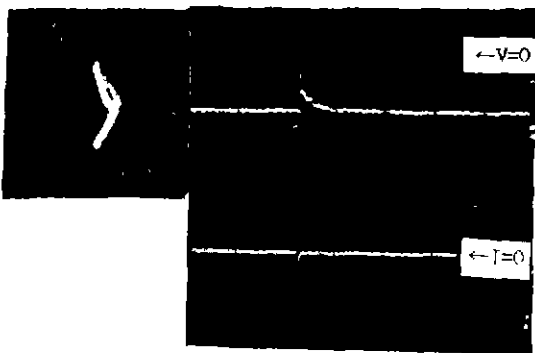
a) $Re=0.26 \times 10^4$ ① $Re=0.26 \times 10^4$ T: 10ms/div
V: 6kV/div I: 3.17mA



b) $Re=0.53 \times 10^4$ ② $Re=0.53 \times 10^4$ T: 10ms/div
 V: 6kV/div I: 3.17mA



c) $Re=0.79 \times 10^4$ ③ $Re=0.79 \times 10^4$ T: 10ms/div
 V: 6kV/div I: 3.17mA



d) $Re=1.06 \times 10^4$ ④ $Re=1.06 \times 10^4$ T: 50ms/div
 V: 6kV/div I: 3.17mA



e) $Re=1.06 \times 10^4$ ⑤ $Re=1.06 \times 10^4$ T: 10ms/div
 V: 6kV/div I: 3.17mA

Photo 1. Discharge paths and current voltage waveform for constant input power

그 결과 사진 1의 ①, ②, ③, ④ 및 ⑤와 같이 저 Re 영역에서는 전압, 전류 파형이 큰 변화가 거져오고, 고 Re 영역에서는 e) 및 ⑤와 같이 Corona가 계속 유지되는데 이것은 그림 3에서 보는 바와 같이 고 Re 영역에서는 V_s 가 포화 되는 경향과 일치한다.

다음은 본 연구에서 실시한 가장 최저 유속인 $1[m/s]$ 에서 온도변화에 따른 V_s 를 다음 (4)식으로 표현하였다.

$$V_s = K (23.98 \rho d + 6.8 \sqrt{\rho d}) [kV] \dots (4)$$

여기서 ρ : 20[°C]의 공기에 대한 상대공기밀도
 $= 0.38 P / (T + 237)$

P: 기압 [mmHg]

T: 온도 [°C]

d: gap 길이 [cm]

이 식은 평등전계에서 V_s 에 관한 식을 응용하여 여기에 불평등계수 $K(0.331)$ 를 곱한 식으로 구성하였다. 그 결과 계산값과 실험값의 오차는 평균 0.69[%]였다.

그림 4는 각 온도에서 Re 의 첫 구간인 $0 \sim 10^4$ 에 대한 V_s 의 비율을 100[%]로 하고, 이것에 대하여 각 구간의 상승률의 비율을 [%] V_s/Re 로 정의하여 나타낸 그림으로써, 그 특성은 그림과 같이 그 감소율이 다르나, Re 의 증가에 따라 점점 감소하는 경향을 보인다. 그 특성중 19.5[°C]에서 가장 많은 감소율을 보이는 것은, 그림 3에서 보이는 바와 같이 Re 의 증가에 따라 저 Re 영역에서 상승률이 많은 변화가 일어나기 때문이다.

그러나 그림 3에서 60[°C]와 100[°C]에서는 포화되는 영역이 없으므로 상승률이 완만한 결과로 나타났다.

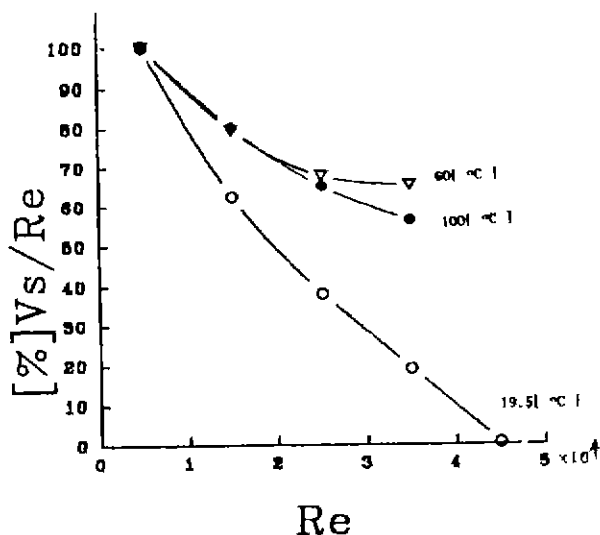


그림4 각 온도(19.5, 60, 100[°C])에서

$$Re \text{에 대한 } [\%] \frac{V_s}{Re}$$

그림4 각 온도(19.5, 60, 100[°C])에서

$$Re \text{에 대한 } [\%] \frac{V_s}{Re}$$

이특성을 수식화하면 다음 (5)식과 같이 된다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A \cdot \text{LOG}_{10} Re + B \quad \dots (5)$$

여기서 A, B는 온도에 따라 결정되는 상수로 시 표 2와 같다.

표 2 온도에 따른 상수 A, B

온도[°C]	상수 x 10 ²	A	B
19.5	-1.48	5.59	
60	-0.94	3.87	
100	-0.50	2.46	

이 식은 본 연구의 각 온도에 대한 유동공기의 V_s 상승관계류 대표하는 식으로 오차는 1.16% 정도로서, 원형관내의 온도변화와 공기흐름에 따른 V_s의 상승율을 표시하는 식으로서 공학적으로 가치있는 식으로 사료 된다.[7]

5. 결론

시원종관 내에서 구간거리, 유속 및 온도를 변화 시켰을 때 부(-)의 직류 방전특성을 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 전압상승률의 관계는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A \cdot \text{LOG}_{10} Re + B$$

여기서 A, B는 상수이다.

2) Reynolds number(Re)의 조정으로 기체의 방전형식 제어가 가능함을 확인하였다.

3) 최저 유속시의 각 온도에 따른 전로파괴전압(V_s)은 다음식으로 표현이 가능하다.

$$V_s = K(23.98 \rho d + 6.8 \sqrt{\rho d})$$

여기서 ρ: 20[°C]의 공기에 대한 상대공기밀도 = 0.38 P / (T + 273)

P: 기압 [mmHg]

T: 온도 [°C]

d: gap 길이 [Cm]

4) 공기 온도가 60[°C]에서 glow corona는 Re가 1.32x10⁴에서 3.97x10⁴까지는 glow corona가 안정하게 유지된다.

이상의 결과를 응용하여 저기압 하에서 유동 기체의 방전현상의 연구를 수행하므로써 광원에 응용할 수 있는 자료를 얻을수 있을 것으로 사료 된다.

參考文獻

- 1) 平山直道 : 流體力學
- 2) Theodore Allen Jr. et al : Fluid Mechanics, 1972
- 3) Kwang-Sik Lee: Report of institute of industrial technology yeungnam university, Vol. 12, No. 1, pp161~166(1984)
- 4) Swanson, B. W, Roit, R. M, & Brown, T. E : IEEE, Vol. PAS, No. P, 2033 (1970)
- 5) 原 雅 測 : 平等電界 中에 設置된 物體의 이온 흐름에 의한 帶電特性의 測定, 電氣學會 論文誌, 55-A 24, 昭和 55年
- 6) K. J. Nygaard : Frequency of Corona Discharge Trichel Pulses In Air Flows, Journal of Applied Physics, Vol 37 No 7, pp 2850~2852, 1966
- 7) Yeung - Hun Kim : Characteristics of Sparkover Discharge In Flowing Air with Reynold Numbers Variable, MS Thesis Graduate school of Y.N University