

# 空氣絶緣 電力設備를 위한 交流全路破壞電壓 —溫度特性에 관한 研究

(A Study on the A.C. Breakdown Voltage-Temperature Characteristics for Air Insulated Power Installation)

金相球 \* · 宋炫直 \* · 金榮燾 \*\* · 李廣植 \*\*\* · 李東仁 \*\*\*

(Sang-Gu Kim · Hyun-Jig Song · Yeong-Hun Kim · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee)

## 요 약

본 연구는 공기절연 전력설비를 위한 교류전로파괴전압 ( $V_{Brms}$ )—온도(T) 특성을 연구할 목적으로 교류 고전압 인가시 온도변화(30[°C]—180[°C])에 따른 유동공기의 전로파괴특성을 기체방전이론과 유체역학 이론을 적용하여 연구하였다. 그리고 본 실험에서의 전극계는 내부직경이 5[cm]인 직원통관에 침대침전극을 배치하였다.

본 연구에서 얻은 중요한 결론은 다음과 같다.  $V_{Brms}$ 은 유속(U)이 증가함에 따라 상승하였다.  $V_{Brms}$ 은 高U에서 포화하였다. 高溫(T : 180[°C])에서는 低溫(T : 30[°C])보다  $V_{Brms}$ 가 4.7(kV)가 낮게 나타났다.  $V_{Brms}$ 은  $V_{Brms} = A \times \text{Log}(Re) + B$ 의 식으로 나타낼 수 있었다. 여기서 A, B는 상수이다.

## Abstract

In this paper, the characteristics of breakdown voltage( $V_{Brms}$ )—temperature(T) for air insulated power installation in flowing air with variation of T(30[°C]—180[°C]) are presented.

To study these subjects, needle-to-needle gap in the circular pipe(inner diameter 5[cm]) are used. Also, the ories of gas discharge and hydrodynamics in pipe were used to analysis for the characteristics.

The  $V_{Brms}$  is proportional to flow velocity. At high velocity,  $V_{Brms}$  is described the saturation. At high T(180[°C]),  $V_{Brms}$  is about 4.7[kV] lower than low T(30[°C]). The empirical equation obtained from this study is  $V_{Brms} = A \times \text{Log}(Re) + B$ . Where A, B : Constant.

## 1. 서 론

기체유전체는 전기적 절연특성이 우수하여 일찍부터 많은 전기기기 및 설비의 절연물로 이용되어 왔다. 최근 전력계통이 고전압, 대용량화됨

에 따라 각종 전기기기의 절연 및 차단계통의 신뢰도 향상을 위하여 이들 기체유전체의 절연특성에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 이들 기체 내에서 발생하는 방전현상들은 대부분의 전기기기나 설비장치에 있어서 장애의 원인이 되므로 그것의 방지를 위한 대책이 마련되고 있으며, 한편으로 이러한 방전현상을 이용한 응용설비들도 운용되고 있다. 따라서 방전현상의 물리적 특성뿐만 아니라 주위환경의 변화에 따른 특성을 해석하는 연구도 필요한 것으로 사료된다.

\* 正會員 : 嶺南大學校 電氣工學科 博士課程

\*\* 正會員 : 浦項專門大學 電氣科 助教授

\*\*\* 正會員 : 嶺南大學校 電氣工學科 教授

接受日字 : 1994年 8月 18日

이러한 기체유전체내의 방전특성은 전극의 형상, 배치, 표면상태, 인가전압의 종류 그리고 온도, 습도, 압력 등 주위환경의 변화에 따라 차이를 가지며, 이들에 관해서는 많은 연구가 행하여졌으며 대부분 정지상태하에서 행한 연구들이다.<sup>1)</sup>

<sup>1)2)3)</sup>

그러나 실제의 Gas Blast Circuit Breaker(GBB), 오존발생기, 전기집진기, 유체발전(EGD, EHD), 방전여기형 기체레이저 등과 같은 기기뿐만 아니라 변전용 변압기, 대전력계통의 송전선로에서의 corona방전과 같은 것은 주위기체가 항상 유동하고 있는 경우들이며 변압기내의 온도상승에 의한 열적과파 또한 큰 문제로 대두되고 있으므로 이들 유동기체의 방전특성해석에 필요한 動的破壞特性에 관한 연구가 필요한 실정이다. 이러한 동적과파특성을 고찰하는 데는 유체내의 매질의 流動狀態와 온도 등 유체 및 열역학적 해석이 필요하며, 기체가 유동함으로써 전극의 냉각 및 아크열의 손실뿐만 아니라 방전시에 발생하는 空間電荷의 분포, 전자밀도의 분포 등의 변화에 따라 방전특성에 많은 영향을 미치게 된다.<sup>4)5)6)</sup>

따라서 본 논문에서는 방전공간에서의 환경인자의 동적과파매다에 관심을 가지고 空氣絶緣電力設備을 위한 全路破壞電壓( $V_{brms}$ )-溫度(T)특성을 연구할 목적으로 침대침 전극을 직원통관내에 조주거리(Inlet length)이후에 수평배치하고 交流高電壓(AC)을 인가하여 전극간거리(d)와 유동기체의 T 및 유속(U)의 변화에 따른  $V_{brms}$ 의 특성을 연구하였다.

한편 관내의 흐름상태와  $V_{brms}$ 과의 관계를 究明하기 위하여 U를 Reynolds number(Re)로 환산하여 특성의 일부를 고찰하였다.

## 2. 管路內의 유속분포와 Reynolds number

관로내의 유체는 시간이 지남에 따라 관단면의 유속분포와 운동에너지가 일정한 상태로 되는 層流영역과 변화가 심한 亂流영역이 있으며 이들 두영역이 공존하는 遷移영역으로 구분된다.

비압축성 점성유체가 수평직원통관내를 흐를 경우 관입구에서 조주거리(Inlet length) 이상이 되

면 유속분포 및 운동에너지는 일정한 상태로 되며 이와 같은 경우 연속방정식은 다음 식 (1)과 같으며, 식 (2)는 Navier-Stokes식이다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots(2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

여기서 x, y, z : x를 공기흐름 방향축으로 하였을 때의 직각좌표계

u, v, w : x, y, z방향의 속도 성분

p : 유로내의 압력

$\rho$  : 공기밀도

$\nu$  : 동점성 계수

t : 시간

위의 식 (1), (2)로부터 층류에서의 유속분포식 (3)을 얻을 수 있으며, 최대유속( $U_{max}$ )와 평균유속( $U_{mean}$ )과의 관계는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

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

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

여기서 L : 원통관과 동축인 가상유체의 길이

r : 관중심에서의 거리

$\Delta P$  : L의 상하 단면사이의 압력차

$\mu$  : 점성계수

또한 난류의 유속분포식은 식 (5)와 같이 되며 최대유속과 평균유속과의 관계는 식 (6)과 같이 된다.

$$U = (1 + 1.326\sqrt{\lambda})U_{mean} - 5.75\sqrt{\frac{\lambda}{8}} U_{mean} \log \frac{\gamma_o}{\gamma_o - \gamma} \dots\dots\dots(5)$$

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

여기서  $\gamma_o$  : 관의 반경

$\lambda$  : 관마찰 계수

이들을 이용하여 유속을 Reynolds number(Re)로 표시하면 다음 식 (7)과 같다.

$$Re = \frac{U_{mean}}{\nu} \times 2r. \dots\dots\dots(7)$$

여기서  $\nu$ : 동점성 계수  
 일반적으로 원통관내의 유체에 흐르는 Re에 따라 다음과 같이 구분한다.

- $Re \leq 2,300$  : 층류영역
- $2,300 < Re \leq 4,000$  : 천이영역
- $Re > 4,000$  : 난류영역

이상의 결과를 이용하여 Re에 따른  $U_{mean}/U_{max}$ 의 비는 그림 1의 실선과 같이 나타나며, 층류영역에서는 0.5이고 천이영역을 지나 난류영역에서는 0.87정도 된다.

이들에 있어서 유속분포의 전형적인 유형을 그림 1의 A), B) 및 C)형으로 나타낸다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

그림 2는 본 실험에 사용된 장치의 배치도를 나타낸 것으로 사용된 전원장치는 交流高電壓 발

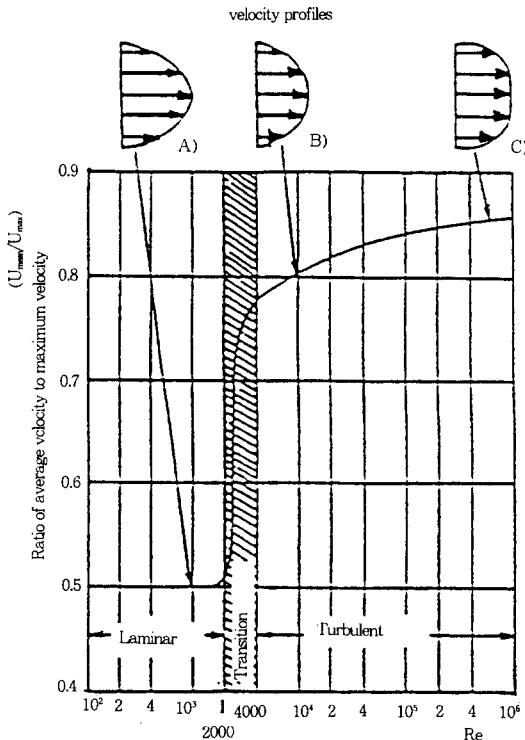


그림 1. 원활한 직원통관내의  $U_{mean}/U_{max}$ 과 Re의 관계  
 Fig. 1. Ratio of average to maximum(center line) velocity versus Re for smooth pipe

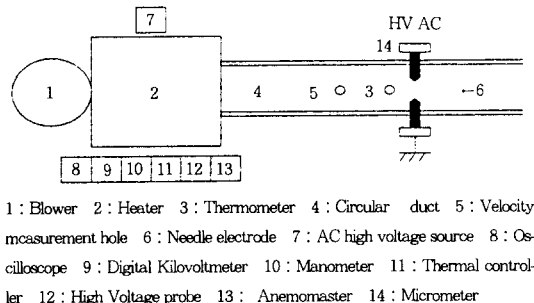
생장치(입력전압 : 100[V], 60[Hz], 출력전압 : 50[kV], 60[Hz])이며, 全路破壞電壓( $V_{Brms}$ )을 측정하기 위하여 High voltage probe(2,000 : 1, Hipotronics社)를 사용하였다. 직원통관은 아크릴(내경 : 5[cm], 외경 : 5.2[cm])로써 총길이는 350[cm]이며, 관측부는 Pyrex glass를 사용하여 방전로의 관측이 용이하도록 하였고, 유동기체는 실내공기로서 Blower를 이용하여 유속(U)을 1~15[m/sec]로 변화시켰다. 또한 유동공기의 온도(T) 변화를 위하여 Heater(220[V], 10[kW])에 전압 제어방식인 Thyristor unit(220[V], 60[A])를 장착하여 T를 30~180[°C]까지 변화시켰다.

본 실험은 침대침 전극(직경 : 0.5[cm], 침단부 예각 30[°])을 조주거리 이후에 배치하여 먼저 유동공기의 T를 30[°C]로 고정시키고 전극간 거리(d)가 1, 2 및 3[cm]일 때, U를 1~15[m/sec]까지 변화시켜가며  $V_{Brms}$ 를 측정하였다. 또한 d를 2[cm]로 고정시키고 유동공기의 온도를 30~180[°C]까지 변화시켜가면서 온도변화에 따른  $V_{Brms}$ 의 관계를 측정하였다. 여기서  $V_{Brms}$ 는 인가전압을 3[kV/sec]로 상승시켜갈 때, 전로파괴가 일어나 전압이 자동차단될 때의 전압으로서 5회 측정하여 산술평균한 값이다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 유속의 변화에 따른 전로파괴전압특성

그림 3은 유동공기의 온도(T)가 30[°C]일 때, 침대침 전극에서 유속(U)의 변화에 따른 全路破壞電壓( $V_{Brms}$ ) 특성을 전극간 거리(d)를 파라메트로 하여 나타낸 것이다.



1: Blower 2: Heater 3: Thermometer 4: Circular duct 5: Velocity measurement hole 6: Needle electrode 7: AC high voltage source 8: Oscilloscope 9: Digital Kilovoltmeter 10: Manometer 11: Thermal controller 12: High Voltage probe 13: Anemometer 14: Micrometer

그림 2. 실험장치의 배치도  
 Fig. 2. Arrangement of experimental devices

그림에서 나타나는 바와 같이 각 d에서 U이 증가함에 따라 상승율은 다르나,  $V_{Brms}$ 은 상승하고 있으며, 低U의 경우에는 상승폭이 대체적으로 크게 나타나고 U이 증가함에 따라 증가율이 둔화되어 포화되는 경향을 보여주고 있다. 또한 d가 큰 경우가 작은 경우보다 U의 영향을 많이 받고있는 것을 알 수 있다. 즉 d가 1[cm]일 경우, 15[m/sec]에서는 1[m/sec]의 경우보다 0.5[kV] 정도의 전압상승이 일어나지만 3[cm]의 경우는 1[m/sec]일 때보다도 약 2[kV]정도가 증가한 결과 d가 길수록 U의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 이것은 d가 큰 경우가 짧은 경우보다 방전로가 기류와의 접촉면적이 증대되므로 방전로의 냉각이 촉진됨과 동시에 기류에 의한 전극의 냉각효과에 기인한 것으로 사료되며, 또한 corona에 의하여 생성된 공간전하도 유속분포에 준하여 형성되어 이들 공간전하가 전계를 강화시켜 전로파괴를 가져온다고 생각된다. 그 결과 전로파괴 방전로는 그림 1의 유속분포에 준하여 형성함을 前報에서 확인한 바 있다.<sup>6)7)</sup>

이와 같이 d가 작은 경우는 방전로의 변형이 d가 큰 경우보다 상대적으로 작게 일어난다.

또한 U의 증가에 따라서  $V_{Brms}$ 가 포화하게 되는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다.

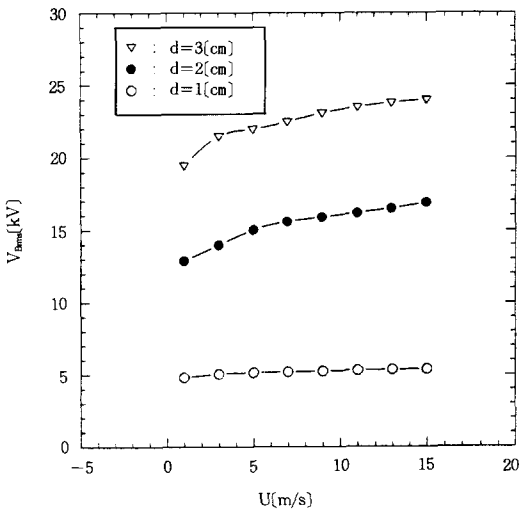


그림 3. d의 변화시 U에 대한  $V_{Brms}$  특성  
Fig. 3. Characteristics of  $V_{Brms}$  for U with variation of d

본 연구의 유속범위에서는 유속이 높아져 난류 영역으로 되면 유속분포는 그림 1의 C) 형으로 유지된다. 이 유속영역에서는 공간전하분포도 C) 형에 준하여 형성되고, 변화가 거의 없이 일정한 유형으로 된다. 그러므로 이 영역에서는  $V_{Brms}$ 가 거의 일정한 값으로 되어 그 특성이 포화하게 되는 것으로 사료된다.

그림 4는 U을 일정하게 하고 d를 변화시켰을 때,  $V_{Brms}$ 의 특성을 나타낸 것이다. 여기서 각 U에 있어서 d의 증가에 따라  $V_{Brms}$ 은 거의 직선적으로 증가하고 그 증가율은 d가 길어질수록 상승한다. 또한 同一한 d에서 U이 증가함에 따라  $V_{Brms}$ 가 상승하는 것은 U이 증가하면 대류손, 냉각손, 분자확산손, 난류확산손 등에 의한 전극부의 냉각효과가<sup>2)</sup> 증대되어 전계방출이 전극의 냉각효과로 인하여 결국 전극의 보유열량이 감소하게 되므로 arc가 일어나기 어렵게 된 결과이며, 이와 같은 현상이 클수록 전로파괴가 일어나기 어렵게 되어  $V_{Brms}$ 가 상승하는 것으로 사료된다.

그림 5는 U을 관로내의 유체의 흐름장을 알아 볼 수 있는 Reynlod number(Re)로 변환하여  $V_{Brms}$ 와 Re의 상용대수값(Log(Re))의 특성을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 거의 직선적인

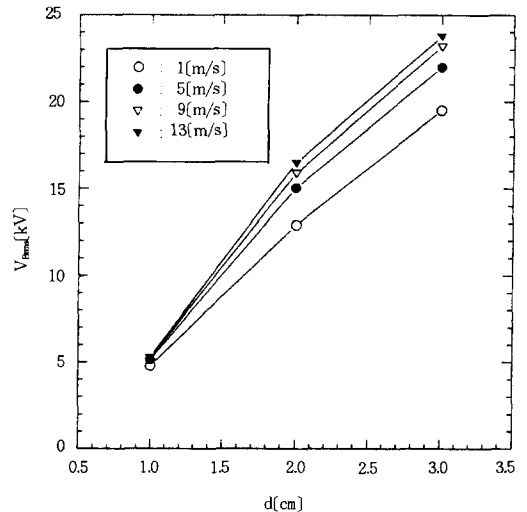


그림 4. U의 변화시 d에 대한  $V_{Brms}$  특성  
Fig. 4. Characteristics of  $V_{Brms}$  for d with variation of U

값을 얻을 수 있다. 본 연구는 대부분 천이영역과 난류영역에서 행하여졌으며, 천이영역에서의 전압상승율은 크게 나타나고 난류영역에서는 상승율이 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 관계는 그림 3의 설명중 U이 높은 곳에서  $V_{Brms}$ 가 포화하는 것과 같은 결과라고 할 수 있다.

4.2 온도변화에 따른 전로파괴전압특성

그림 6은 d가 2[cm]인 침대침 전극에서 T를

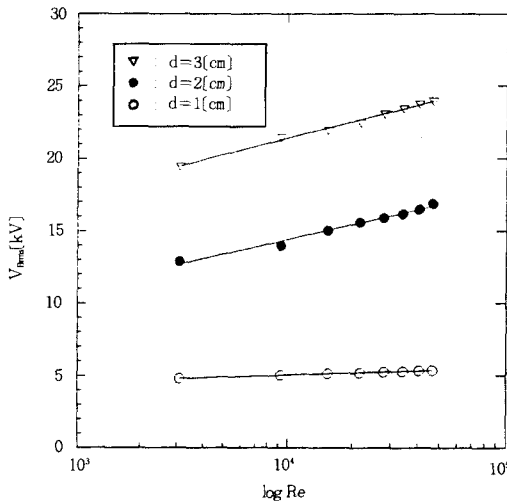


그림 5. d의 변화시 Log[Re]에 대한  $V_{Brms}$  특성  
Fig. 5. Characteristics of  $V_B$  for Log[Re] with variation of d

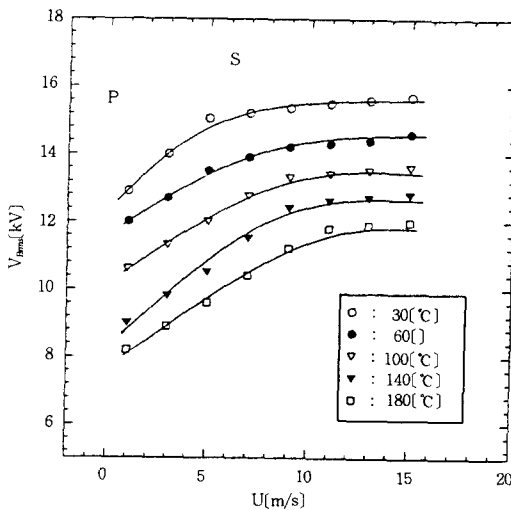


그림 6. T의 변화시 U에 대한  $V_{Brms}$  특성  
Fig. 6. Characteristics of  $V_{Brms}$  for U with variation of T

과파라미터로 하여 U의 변화에 따른  $V_{Brms}$ 의 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 U이 증가함에 따라  $V_{Brms}$ 가 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 U이 증가하면 기류에 의해 corona 방전시 생성된 공간전하가 쉽게 하류로 확산되어 도전성의 영역을 변화시켜 하류의 전계가 강화된 결과 방전로의 길이가 신장되고 방전로가 기류와의 접촉면적이 증가되어 방전로 냉각의 촉진<sup>7)</sup> 및 각종 손실 등에 의한 전극부의 冷却 효과가 증대되어 前述한 바와 같이 전극의 보유열량이 감소하게 되므로 전로파괴가 일어나기 어렵게 된 결과라고 할 수 있다. 또한 유동공기의 T가 낮을수록 어느 일정한 Log[Re]에서 arc 초당보유열량의 감소로 T가 높을 때 보다 냉각효과가 증대되므로  $V_{Brms}$ 가 높게 나타났다.

또한 그림에서와 같이 유속증가에 대한  $V_{Brms}$  특성이 T에 따라 포화되는 U이 다르게 나타나서 T가 높을수록 포화하기 시작하는 U이 높게 나타난다.(그림의 P영역(직선상승영역), S영역(포화영역)), 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다. T가 높아지면 동점성계수( $\nu$ )가 커지고 그 결과 Re가 작게 된다. Re가 작게 되면 더욱더 U을 상승시켜야 난류의 흐름장이 되어 공간전하의 분포상태가 그림 1의 C)형으로 되어 공간전하의 분포

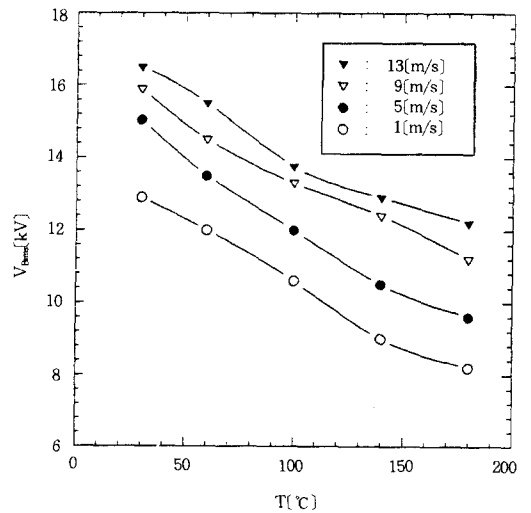


그림 7. U의 변화시 T에 대한  $V_{Brms}$  특성  
Fig. 7. Characteristics of  $V_{Brms}$  for T with variation of U

상태가 거의 일정하게 된 결과  $V_{Brms}$ 가 포화하게 되는 것이다. 그러므로 P영역과 S영역의 경계(일점쇄선)가 수직하로 이루어지지 않고 그림과 같이 형성된다.

그림 7은 U을 파라미터로 하여 T의 변화에 따른  $V_{Brms}$ 의 특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 T가 높아짐에 따라  $V_{Brms}$ 은 낮게 나타났으며, 유동공기의 T가 180[°C]일 때의  $V_{Brms}$ 는 30[°C]일 때보다 평균 4.7[kV] 낮게 나타났다. 또한 U이 13[m/s]인 경우가 1[m/s]인 경우보다 평균 3.6[kV] 높게 나타났다. 이것은 T가 높을수록 U의 증가에 따라 에너지 손실에 의한 냉각효과가 상대적으로 저하하게 되어 전계방출이 용이해지므로  $V_{Brms}$ 가 저하하는 것으로 사료된다.

그림 8은 그림 6의 U을  $\text{Log}(Re)$ 로 변형한 특성이며, 이것을 수식화하면 다음 식 (8)과 같다.

$$V_{Brms} = A \times \text{Log}(Re) + B \dots\dots\dots (8)$$

온도[°C]	30	60	100	140	180
상수 A	1.059	1.052	1.211	1.569	1.578
상수 B	4.476	4.718	1.061	-3.217	-3.872

이 식은 본 연구의 결과를 대표하는 식으로 오차가 평균 5[%]로 공학적으로 유용한 식으로 사

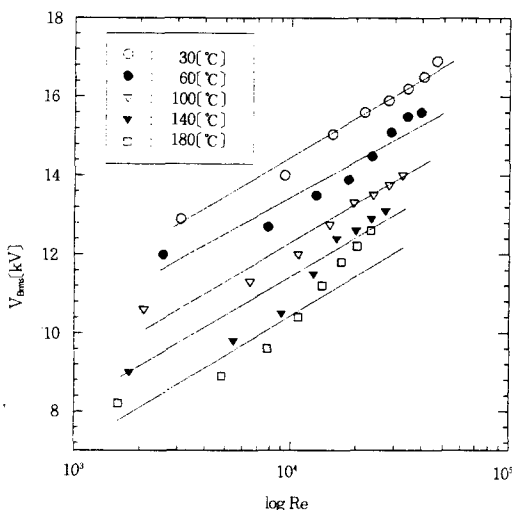


그림 8. T의 변화시  $\text{Log}(Re)$ 에 대한  $V_{Brms}$  특성  
Fig. 8. Characteristics of  $V_B$  for  $\text{Log}(Re)$  with variation of T

료된다.

## 5. 결 론

空氣絶緣 電力設備를 위한 全路破壞電壓( $V_{Brms}$ ) - 溫度(T)특성을 연구할 목적으로 직원통관내의 조주거리 이후에 침대침 전극을 공기의 흐름방향에 수직이 되게 배치하고 전극간거리(d), 유동공기의 T 및 유속(U)을 변화시켜 가면서 交流高電壓에 대한 電路破壞電壓( $V_{Brms}$ )의 특성을 氣體放電理論과 流體力學理論을 적용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) U이 증가함에 따라  $V_{Brms}$ 은 상승하며 d가 짧을수록 U의 영향이 적다.
- 2) U의 흐름이 층류에 가깝게 되면 난류의 경우보다 U의 영향을 크게 받으며, U이 13[m/sec]인 경우가 1[m/sec]인 경우보다 평균 3.6[kV] 높게 나타났다.
- 3) T가 높으면  $V_{Brms}$ 은 낮게 나타나며, 180[°C]일 때의  $V_{Brms}$ 은 30[°C]일 때보다 평균 4.7[kV] 낮게 나타났다.
- 4) 본 연구의 Re와  $V_{Brms}$ 와의 관계는 다음 식  $V_{Brms} = A \times \text{Log}(Re) + B$ 으로 나타낼 수 있었다. 앞으로 U과 T를 더욱 높은 영역까지 확장하여 연구검토하면 좋은 결과가 얻어지리라 믿으며 본 연구는 많은 유동기계의 응용분야 및 공기절연 전력설비 설계의 자료로 이용될 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- 1) J. M. Meek, J. D. Craggs : Electrical breakdown of gases. John-wiley & Sons, 1978.
- 2) 鳥山四南 外 : 放電ハンドブック, 日本電氣學會, 1975.
- 3) 全春生 : 放電高電壓工學, 東明社, 1980.
- 4) 靜電氣學會編 : 靜電氣 핸드ブック, 오ーム社.
- 5) M. Khalifa : "Analysis of the effects of wind on DC transmission line, corona losses", IEEE PES Paper, No. C-73-162-3, 1973.
- 6) 李廣植 : "流動空氣中 針對針電極의 放電特性", 大韓電氣學會論文誌, 34卷 12號, 1985.
- 7) 李廣植, 宋炫直 外 : "溫度變化를 고려한 流動氣體의 放電特性에 관한 研究", 大韓電氣學會論文誌, 42卷4號, 1993.

◇ 著者紹介 ◇



金相球(김상구)

1953年 1月 24日生. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸. 1993년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 경북지방공업기술원 전기전자실장. 당학회 대구지회 이사.



宋炫直(송현직)

1968年 7月 30日生. 1991년 영남대 공대 전기공학과 졸. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



金榮燦(김영훈)

1963年 4月 12日生. 1986년 영남대 공대 전기공학과 졸. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 포항 전문대학 전기과 조교수



李廣植(이광식)

1948年 10月 20日生. 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 현재 영남대 공대 전기공학과 교수. 당학회 대구지회장겸 편수위원장



李東仁(이동인)

1936年 10月 19日生. 1959년 서울대 공대 전기공학과 졸. 1973~1977년 영국 Strathclyde대 대학원 졸(박사). 1982~1983년 미국 South Claifornia대 방문교수. 현재 영남대 공대 전기공학과 교수. 당학회 대구지회 이사.