

# Reynolds Number를 變數로한 流動空氣의 放電特性

Characteristics of Sparkover Discharge in Flowing  
Air with the variation of Reynolds Number

金榮燾\* · 李廣植\*\* · 李東仁\*\*\*

(Yeong-Hun Kim · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee)

## 요 약

본 연구에서는 Reynold수가  $0-10.52 \times 10^4$ 의 범위에서 유동공기중의 전로파괴의 특성을 연구하였다. 또한 일정한 입력전력에서 Reynold수의 조정에 의한 방전 Pattern의 변화를 연구하였다. 그리고 실험에 사용된 流路는 원통관이다. 측정부에서의 흐름은 완전히 발달한 層流로 이루어졌다. 본 연구에서 얻은 중요한 결과는 다음과 같다. 유동공기중의 전로파괴는 공기의 흐름장 이론에 의해 분석이 가능하며 전로파괴전압은 Reynold수가  $3 \times 10^2 - 4 \times 10^4$ 의 범위에서 거의 최대값을 나타낸다. 유동공기중의 최대전로파괴전압은 정지시보다 평균 6.3[kV]높게 나타났다. 방전 pattern은 Reynold수의 조정에 의하여 제어할 수 있었다.

## 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 Reynolds number. Flowing air duct of this investigation is a circular tube. The flow at the experimented positions' section is described as fully development laminar flow.

The important results obtained from this study are as follows. The sparkover discharge path of flowing air can be analyzed by the theories of flow field for air. The sparkover voltage shows nearly the maximum value when the Reynolds number of flowing air ranges  $3 \times 10^2$  to  $4 \times 10^4$ . The maximum sparkover voltages of flowing air are about 6.3[kV] higher than those of static air. The discharge pattern can be controlled by adjustment of the Reynolds number.

\*正會員：嶺南大學校 大學院 碩士課程

\*\*正會員：嶺南大學校 電氣工學科 副教授

\*\*\*正會員：嶺南大學校 電氣工學科 教授

接受日字：1990年 11月 24日

## 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 도장 장치(electrostatic powder coating), 오존 발생기(ozon generator), 전기 집진장치(electric precipitator) 및 Air Blast Circuit Breaker(ABB) 등에 널리 응용되고 있다.

많은 학자들에 의해서 정지시 공기의 방전특성 解析은 많은 진전을 보았다. 1939년 Casie와 1949년 Mayer에 의해 arc의 동적방정식<sup>1)</sup>이 정립된 이래로 1973년 川崎 등에 의해 이온풍의 거동에 관해서 연구되었으며<sup>2)</sup>, 1980년대 초부터 原등은 이온풍의 대전특성, 이온풍속 특성, 이온풍 반동력 특성, 이온류장의 전계 특성 등 諸現象에 관하여 연구하였다.<sup>3)~6)</sup>

한편, 유동 공기의 방전 특성에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 공기가 유동함으로써 방전에 미치는 영향에 관해서는, 1966년 K. J. Nygaard가 유동공기에 따른 trichel pulse의 주파수 변화에 대해서 연구하였고<sup>7)</sup>, 1967년 M. Khalifa는 直流 corona에 있어서 공기유동의 효과에 관해서 보고하였으며<sup>8)</sup>, 또한 1973년에는 유동공기가 送電線의 corona 손실에 미치는 영향에 관해서도 발표하였다<sup>9)</sup>. 1974년 Wolfgang은 각종 전극을 사용하여 방전로 자태가 유체의 흐름에 의존함을 확인하였다.<sup>10)</sup>

1982년 M. Hara는 전계분포와 전류밀도에 대한 유동공기의 영향에 대해서 연구하였으며<sup>1)</sup>, 1986년부터 關谷, 高木등이 기류에 의해 공간 전하를 의도적으로 변화시켰을 때의 방전로 및 전압의 변화와 corona방전 그리고 放電勵起形

氣體 Laser에 응용 가능성에 대해서 활발히 연구하고 있다.<sup>12)~14)</sup>. 그러나 국내에서는 유동기체의 방전특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이러한 관점에서 本 研究은 유동에 따른 全路破壞 전압의 상승관계를 연구할 목적으로 流體力學的인 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, 全路破壞時 電壓 및 電流波形을 관측하고 전로파괴의 消弧特性을 연구 검토하며, 또한 Reynold수의 조정에 의하여 공기의 放電形式의 制御에 관한 연구를 위하여 放電初期의 전압, 전류를 일정히 하고 Reynold數를 변화시켜 갈때 放電形式의 變化 Pattern을 연구하고자 한다.

## 2. 流速分布式

潤滑한 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 速度分布, 管摩擦에 의한 壓力 손실의 比率 및 관단면을 지나는 유체의 운동에너지는 일정한 상태가 된다.<sup>15)~16)</sup>

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

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

(2)와 같다.

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

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

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

다음은 亂流에서의 유속분포식인 Nikuradse

의 식<sup>[9]</sup> 즉 식(5)를 이용하여  $U_{mean}$  과  $U_{max}$ 와  
의 관계를 식(6)으로 표현할 수 있다.

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

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

위와 같이 하여 난류분포식은 식(7)과 같이  
되며 관마찰계수는  $Re \leq 10^5$ 인 범위에서는 Bl.  
asius식 즉 (8)식,  $Re > 10^5$ 인 범위에서는 Niku.  
radse식 즉 식(9) 및  $Re$ 의 식은 식(10)을 이  
용하였다.<sup>15)</sup>

$$U = (1 + 1.326\sqrt{\lambda})U_{mean} - 5.75 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \cdot U_{mean} \log_{10} \frac{r_0}{r_0 - r} \dots\dots\dots(7)$$

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4}, (Re \leq 10^5) \dots\dots\dots(8)$$

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 \cdot Re^{-0.237} (Re > 10^5) \dots\dots(9)$$

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

위의 식(3), (7), 즉 층류와 난류에서의 속  
도분포를 도시하면 그림1과 같은데 관중심으로  
부터 반경방향의 거리에 대한 유속의 증분은

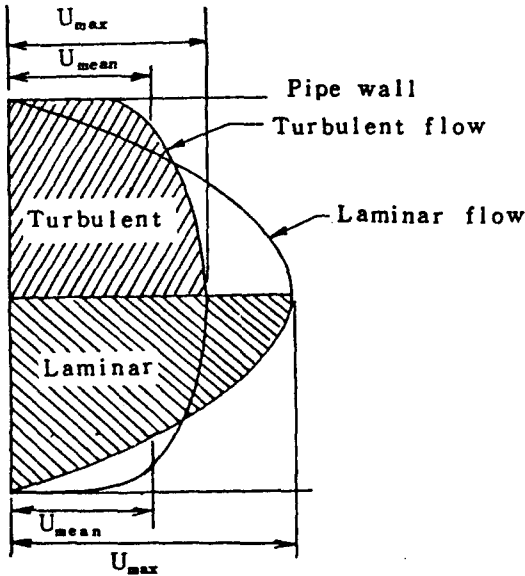


그림 1. 윤향한 원관내의 층류와 난류의 속도분포도  
Fig. 1. Velocity profiles in laminar and turbulent  
flow for smooth pipe.

층류일때가 난류일때 보다 크게 나타나며 관의  
중심에서 최대 유속을 가진다.

최대유속과 평균유속의 비를  $Re$ 에 따라 도  
시하면 그림2의 실선으로 표현되는데 층류에서  
는 0.5이고 천이역을 지나서 난류일 때는 증가  
되어 0.87정도로 된다. 위의 결과로 유속 분포  
의 전형적유형은 그림2의 A), B), 및 C)형으  
로 나타난다.

### 3. 實驗裝置 및 方法

#### 1. 實驗裝置

그림3의 (a), (b)에 본 실험을 위한 回路圖  
와 裝置의 配置圖를 나타 내었다. 실험에 사용  
된 전원은 (-) 직류고압 발생장치(입력전압 110  
[V], 60[Hz], 출력전압 60[kV], Hipotronics inc.)를

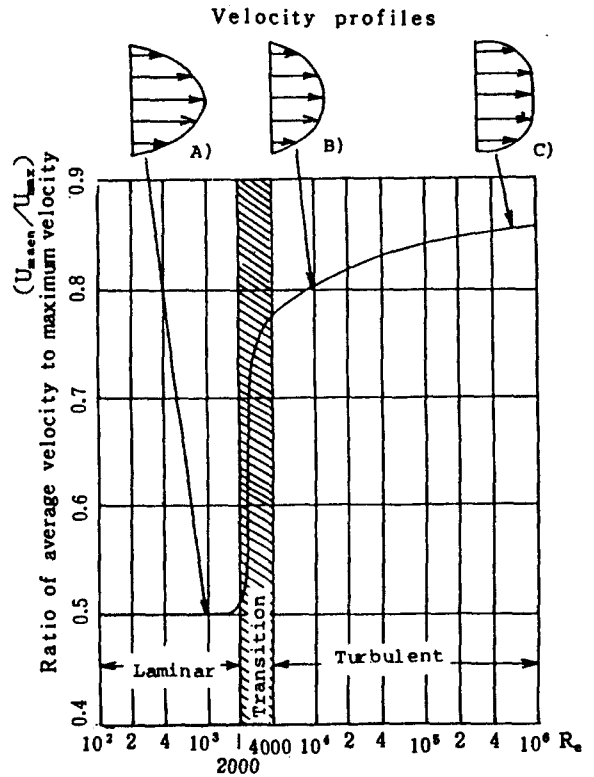
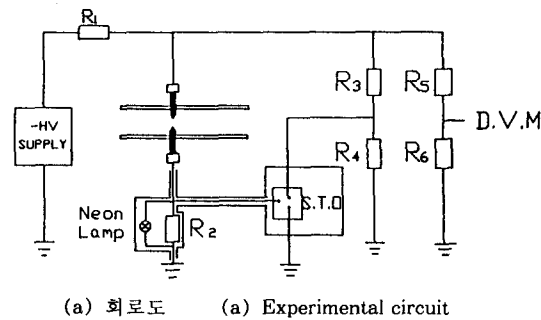


그림 2. 윤향한 원관내의  $U_{mean}/U_{max}$ 와  $Re$ 의 관계  
Fig. 2. Ratio of average to maximum(center line)  
velocity versus  $Re$  for smooth pipe

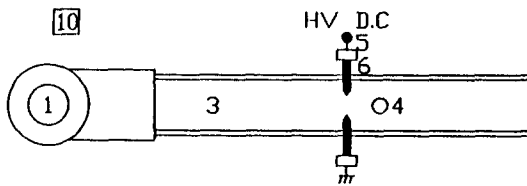
사용하였다. 直圓筒管은 투명 아크릴 원통(內徑 5.3[cm], 外徑 5.9[cm], 길이 596.4[cm])이다.

$R_1$ 은 全路破壞時 전류제한용 저항이고,  $R_2$ 는 전류를 측정하기 위한 저항이며, 고전압을 측정하기 위하여 voltage divider( $R_3 : R_4 = 2000 : 1$ ; Hipotronics Inc.)와 digital kilovoltmeter( $R_5 : R_6 = 2000 : 1$ ; 정밀도 Full Scale의  $\pm 1[\%]$ , 同社)를 사용하였다. 네온램프는 Oscilloscope 보조용으로 사용되었으며, 전압, 전류 파형을 관찰하기 위하여 Storage Type Oscilloscope(S.T.O)를 사용하였다. 또한 流動氣體는 室內空氣(온도 20~30[ $^{\circ}$ C], 습도 80~85[ $\%$ ], 기압 757~579[mmHg])를 유동시켰다.

전극은 針電極으로서 길이 10[cm], 직경 0.5[cm], 첨단부 예각 15[ $^{\circ}$ ], 曲率半徑  $1.35 \times 10^{-2}$ [cm]의 黃銅製 전극으로서 상류에서 조주거리 이후인 293.1[cm] 떨어진 지점에 원통관의 직경축에 배치하였다.



(a) 회로도 (a) Experimental circuit



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

(b) 실험장치의 배치도  
(b) Arrangement of experimental devices

그림 3. 실험회로와 장치의 배치도

Fig. 3. Experimental circuit and experimental device

## 2. 實驗方法

전극간 거리(d)를 1, 2, 3[cm]로 하여 각 d마다 流速을 0~30[m/sec]까지 변화시켜가면서 전로파괴전압과 空氣의 평균유속 과의 관계를 측정하였으며, 측정치는 4회 측정하여 평균값을 취했다. 이때 측정된 전로파괴전압은 3[kV/sec]로 상승시켜갈때 전로파괴가 일어나 전원이 자동 차단될때의 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 검토하였으며, 전로파괴 지속시간은 각 Reynold數에서 전로파괴가 일어나 전원이 자동 차단되기 직전에 Storage type oscilloscope에 나타난 전압, 전류 pulse를 Camera로 촬영하였다. 이때 전극간거리 1[cm]일때의 방전로 모양을 촬영하였다. 다음은 전극간 거리를 1[cm]로 하여 초기전류, 전압을 일정하게 하고, Reynold數를 증가시키면서 전로파괴의 소호특성을 관찰하였다. 이때 Reynold數의 변화에 따라 방전형식의 변화 pattern을 알아보기 위하여 방전로 모양에 따라 Storage type oscilloscope에 나타난 전압, 전류 pulse와 각 방전로의 정지사진을 촬영하여 그 전형적인 모양을 그림으로 나타내었다.

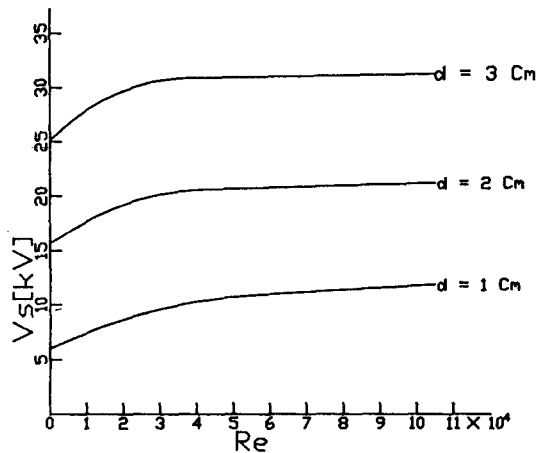


그림 4. Vs와 Re와의 관계

Fig. 4. Sparkover discharge voltage versus Reynolds number

4. 結果 및 檢討

1. Re와 전로파괴전압 및 방전로

유속에 따른 Reynold수와 전로파괴전압(Vs)의 변화는 그림4와 같다. 각전극간 거리에서 전압 上昇率은 다르나 낮은 Re영역(Re=0~Re=4×10<sup>4</sup>)에서는 전압 上昇率이 크며 그 이상에서는 전압 상승율이 완만한 후 거의 포화되는 경향이다. 全路破壞電壓과 전극간 거리와의 관계를 그림5에 나타내었다. d가 증가함에 따라 Vs가 상승하는 것은 流動時에도 靜止時와 같은 유형이나 Re가 증가함에 따라 전압상승율의 폭이 좁아지는 것은 그림4에서 보여주는 것 처럼 Re가 증가함에 따라 Vs의 특성이 완만해지기 때문이다. 이렇게 Vs의 특성이 완만하여 지는 것은 후술하고자 한다. 그 결과 유동시의 최대 전로파괴전압은 정지시보다 평균 6.3[kV]높게 나타났다.

낮은 Re영역에서 전압상승율이 크게 나타나는데 이것은 Ion풍이 하류로 편이되므로 하류의 電界가 강화된 결과 방전로가 유속분포에 준하여 하류로 형성된다.<sup>4) 7)</sup> 그 결과 방전로의 길이가 伸張되어 氣流와의 접촉 면적이 증대되므로 방전로의 냉각이 촉진되는 현상, 그리고 기류에 의한 전극의 冷却作用에 기인한 것으로 사료된다.<sup>19)</sup>

다음은 Vs가 포화되는 영역인데 이 영역의 전로파괴 지속시간은 그림6에서 보여주는 바와

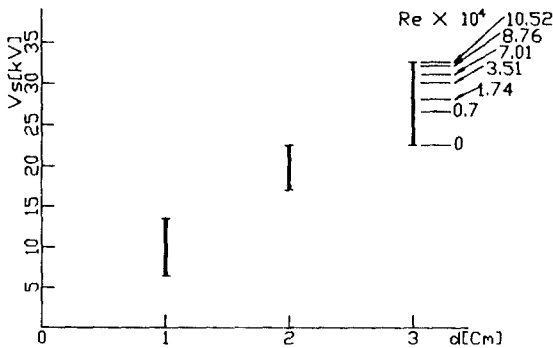


그림 5. Vs와 d와의 관계

Fig. 5. Sparkover discharge voltage versus gap length(d)

같이 거의 같게 나타나며 全路破壞路의 모양도 사진1에 나타나는 바와 같이 유사하게 형성된다. 이와같이 전로파괴 지속시간이 거의 같고, 또한 전로파괴로의 모양이 유사하다는 것은 Vs의 값이 거의 동일하게 나타남을 입증하여 준다.

사진1은 그림4의 d가 1[cm]인 경우의 Vs측정시의 Re에 따른 방전로 모양을 나타내는데, (a)는 정지시의 全路破壞路로서 전극사이 최단 거리로 형성되며, (b), (c)는 저 Re 영역의 全路破壞路로서 그림2의 B)의 形態를 취하며 (d), (e), (f)는 그림2의 C)의 형태를 취한다. 이것은 방전시 발생한 空間電荷가 하류로 편이하여 방전로가 유속분포에 준하여 형성되며, 이 형성된 곳의 電界強度가 크게되어 전로파괴로가 이와같은 모양을 취하게 된다. 低 Re 영역에서 Vs가 상승한 결과와 비교하여 볼때(a)

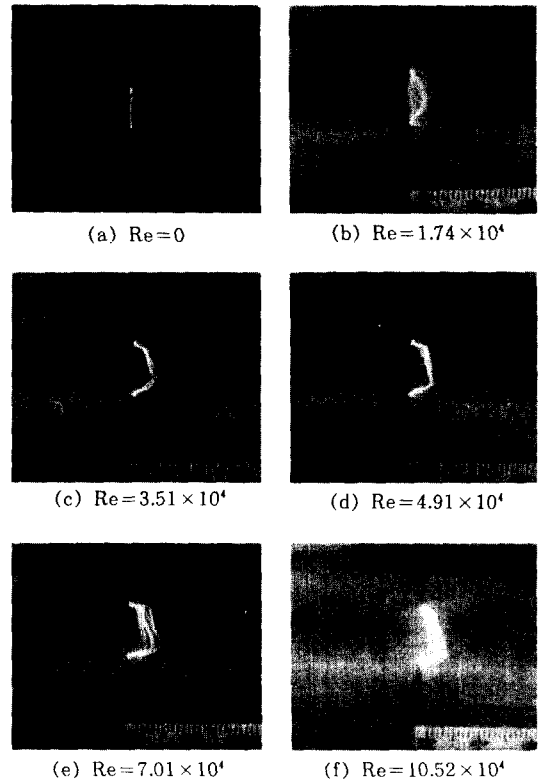


사진 1. 전로파괴로의 모양

Photo. 1. Photographs of the sparkover discharge path

에서 (c)까지는 방전로의 변화가 심하며 이것은 곧  $V_s$ 의 변화가 큼을 확인하여 주며,  $Re = 4.91 \times 10^4 \approx 5 \times 10^4$  이상에서는 방전로의 모양이 같은 유형인데 이것은 바로 이  $Re$  영역에서  $V_s$ 가 거의 일정히 포화된 결과로 나타난다.

## 2. $Re$ 와 전로파괴지속시간

그림6은 全路破壞持續時間( $t$ )과 Reynold수와 의 관계를 나타낸것이고, 사진2는 전로파괴시 전압, 전류파형이다.  $Re$ 가 증가함에 따라 전로파괴 지속시간이 짧아지며 지속시간의 변화폭도 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 Yutaka Nis-

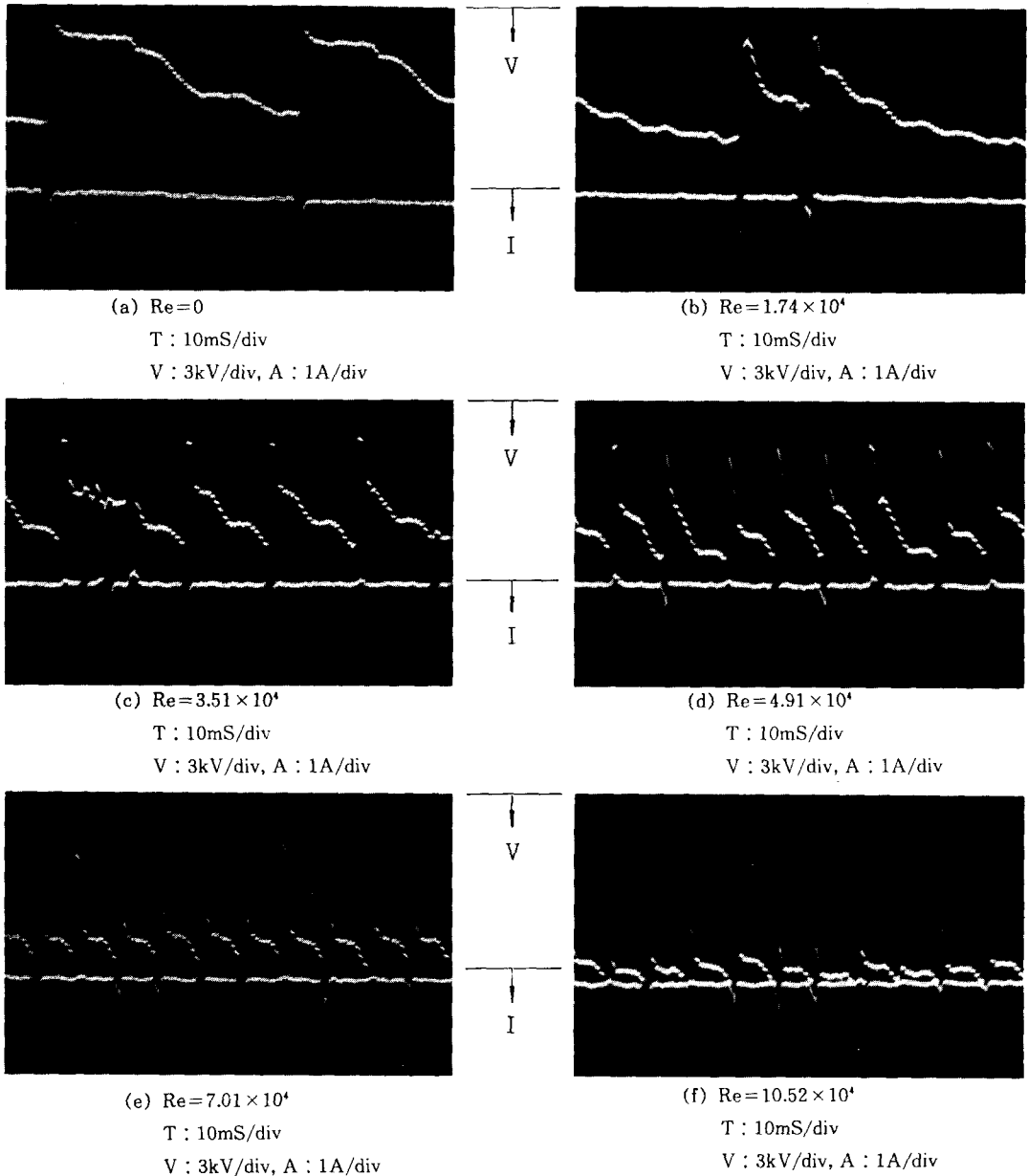


사진 2. 전로파괴시의 전압, 전류파형

Photo.2. Waveforms of sparkover discharge current and voltage

himura 등의 전로파괴 지속시간에 관한 연구결과와 유사함을 알 수 있다.<sup>20)</sup>

Reynold수의 증가에 준하여 전로파괴지속시간이 짧아지는 것은 방전로가 하류로 신장되어 공기와의 접촉면적이 증가되므로서 방전로의 냉각이 촉진되고, 기류에 의해 전극이 냉각되며, 이온풍이 하류로 편이된 결과로 사료된다. 이와같이 Reynold數의 증가에 준하여 전로파괴 지속시간이 짧아진다는 것은 방전전류가 작아진다는 뜻으로 방전전류가 적다는 것은 상대적으로 Vs의 상승을 가져옴을 의미한다. 이상의 결과는 사진2에서 보여주는 바와 같은 전압, 전류파로서 확인할 수 있었다. 그결과 低 Re 영역의 전압, 전류 파형은 전로파괴로가 많은 변화를 가져옴과 같이 전압, 전류의 파형 또한 변화가 크게 나타나는데, 이것 또한 이 영역의 Re에서는 Vs가 크게 상승하는 결과를 뒷받침하여 준다. 또한 저 Re를 넘으면 방전로가 거의 동일한 양상인 것과 같이 전압, 전류 파형 또한 거의 같은 유형임을 볼 수 있다. 이것은 이 영역의 Vs가 포화됨을 입증하여 준다.

3. Re의 조정에 의한 放電形式의 制御

다음은 Re의 변화에 따라 방전형식의 변화 pattern을 조사하여 Vs의 상승관계를 더욱 명확히 규명하고 入力電力이 일정할때 Re에 따라 방전형식의 변화 pattern을 알아보기 위하여 全路破壞 최기의 전류, 전압을 일정하게 유지시켜 놓고 Re를 변화시켰을 때의 전류, 전압

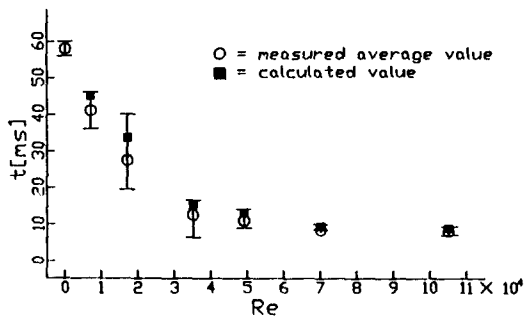


그림 6. Re와 방전지속시간과의 관계

Fig. 6. Reynolds number versus duration time of sparkover discharge

관계를 그림7에 나타내었다. Re를 서서히 증가시켜 가면서 Re에 따른 放電樣相을 관찰한 결과, Re가 증가함에 따라서 전류는 급격하게 떨어지고 전압은 급상승하다가 거의 수평을 이루는 부분에서 corona상태가 된다. 다시 전로파괴가 일어나게 하려면 전압을 올려야 하므로, 이것은 그림4에서 보는바와 같이 Re에 따라 전로파괴 전압이 상승하는 원인이 된다. Re를 더욱 증가시키면 전극 부근에서 逆流現象이 일어나 空間電荷가 전극 가까이에 雲集하게 되므로 초기전류가 큰 경우(2.7mA)에서는 다시 간헐적인 전로파괴가 일어난다.

그림8은 Re를 증가시키에 따라 변하는 방전로 모양의 윤곽도를 나타낸 것이고, 그림9는 각초기전압, 전류에서 전로파괴 시킨후 Re를 증가시켜 갈때 방전형식의 변화 pattern이 그림8의 어떤 방전로 모양을 취하는지를 보여주는 것이며, 사진3은 그림8의 각 방전형식에서 전압, 전류 파형의 사진이다. Re를 증가시키면 초기전류가 낮을때 (0.45mA, 1.5mA)는 방전

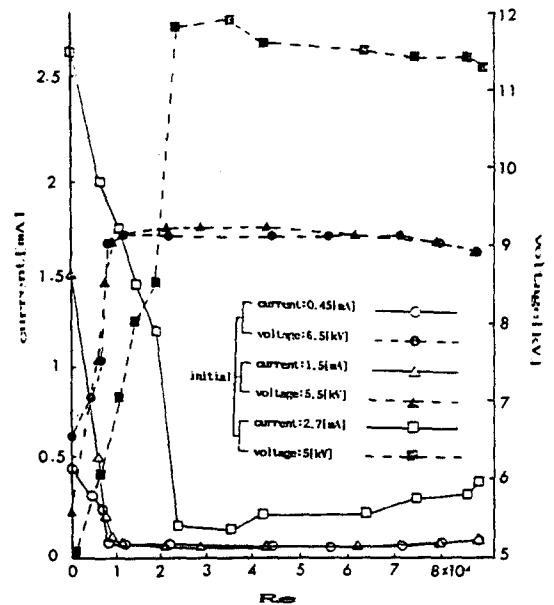


그림 7. 일정한 入力전력에서 Re와 전압·전류관계

Fig. 7. Reynolds number versus current and voltage for constant input power

형식의 변화 pattern이 그림9에서 보여주는 바와 같이 pattern 1로 표현가능하다 이 pattern 1은 I → II → III → IV → VI으로 변화되는데, 방전로 모양이 III의 경우에는 III - I 과 III

- II 가 교번하여 발생하므로 전로파괴와 corona상태가 번갈아 일어난다. 방전로 모양이 III - II, IV의 경우에는는 접지축 전극에서 생성된 glow corona가 기류에 따라 하류로 흐르

기 호	I	II	III		VI
			III - I	III - II	
방전로모양					
특기사항	초기전압, 전류에서의 전로파괴	기류에 의해 전로파괴가 하류로 약간 편이됨	간헐적인 전로파괴가 일어남 (III - I 이 일어나지 않을때는 III - II가 일어남)	외관은 접지부 침 선 단 부의 corona 방전로가 기류에 의해 하류로 편이된 상태이며 이때의 pulse는 trichel pulse로 천이과정의 pulse이다.	corona의 외관은 III - II와 같으며 corona pulse는 VI의 경우보다 pulse의 주파수가 높은 다소 불안정한 trichel pulse의 형태임
기 호	V	VI	VII		
			VII - I	VII - II	
방전로 모양					
특기사항	방전모양은 glow corona이며, 전류 pulse는 pulseless glow corona이다.	접지부corona 발광부와(-) 전극의 발광부가 서로 교락된 상태. 이때의 pulse는 안정된 trichel pulse임	간헐적으로 전로파괴가 일어남.(전로파괴가 일어나지 않을때는 VII - II의 형태임)	전압, 전류의 크기는 다르나 방전로모양은 V와 동일	

그림 8. 일정한 입력전력에서 방전로의 운과도

Fig. 8. Configurations of discharge path for constant input power



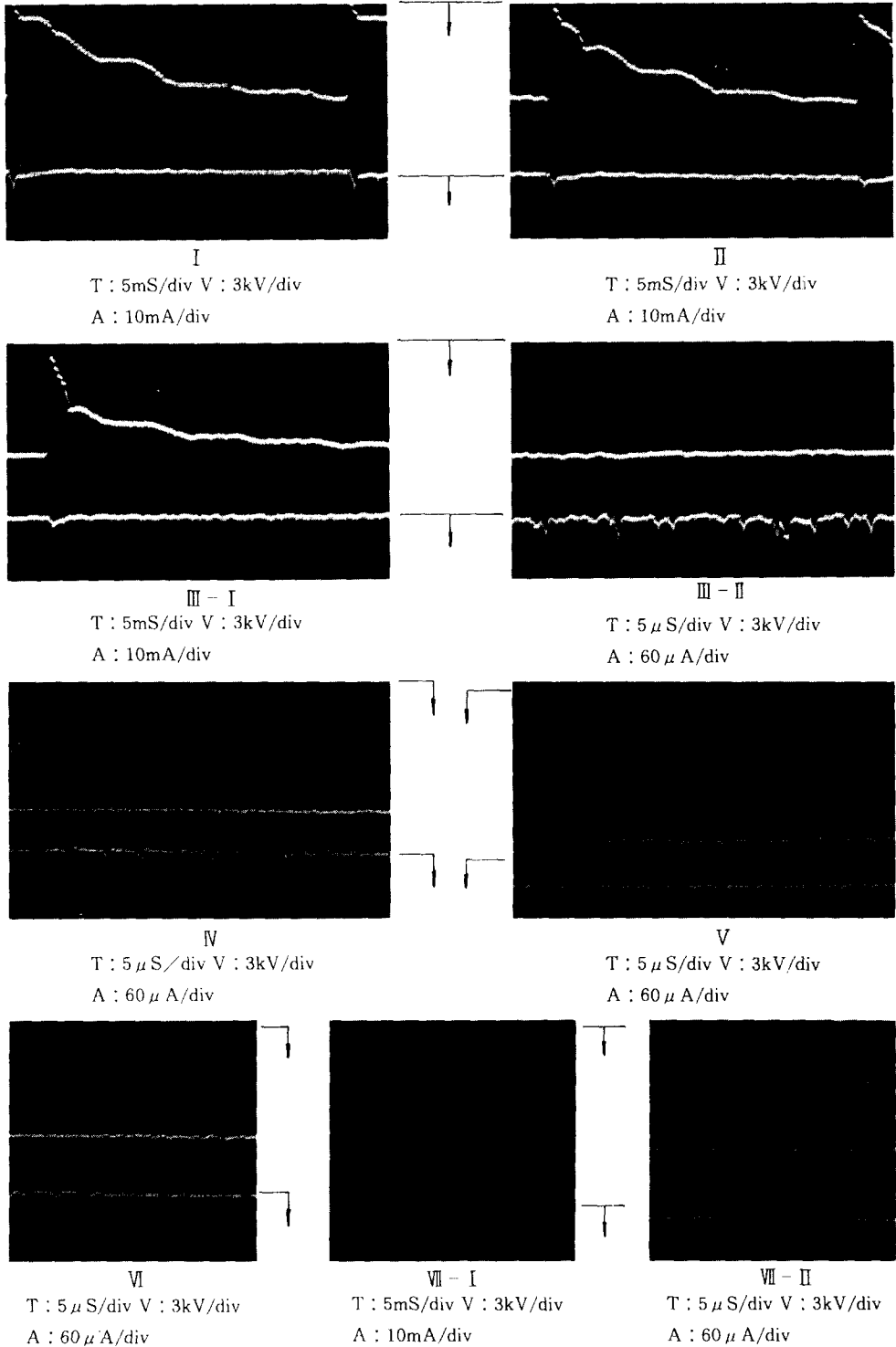


사진 3. 입력전력이 일정한 경우 전압·전류파형  
Photo.3. Waveforms of current and voltage for constant input power

는 모양을 하고 있다. 이것은 방전시에 생성된 負의 空間電荷가 기류에 의하여 하류로 이동하여 접지측 전극주위의 전계를 강화시킨 결과이다. 이때 III - I의 corona pulse는 사진3에서 보는 바와 같이 trichel pulse로 천이하는 과정의 pulse가 나타난다. 그리고 IV의 경우 전류 pulse는 VI의 경우보다 pulse의 주파수가 높으며 VI보다 불안정한 trichel pulse의 형태이다. VI의 경우는 접지부 corona발광부와 (-)전극의 발광부가 시각적으로 교락된 형태의 corona를 유지하며 전류 pulse는 안정된 trichel pulse를 이룬다.

그리고 초기전류가 큰 경우(2.7mA)에는 pattern2로서 그 변화 과정은 I → II → III - I → V → VII로 변화 되는데, III의 경우는 III → II는 나타나지 않고 III - I의 방전형태만 나타난다. V와 VII - II는 glow corona 형태로서 사진3에서 보는바와 같이 pulseless corona이다. VII의 경우에는 VII - I의 형태가 교번되어 간헐적인 전로파괴가 일어난다. 이때는 전술한 것과 같이 Re를 증대시키면 전극 주위에 역류현상이 일어나 공간전하가 전극주위로 운집하여 이곳의 전계가 강화되기 때문이다.

그림9의 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 전로파괴의 억제현상으로 볼 수 있다. 그러므로 입력전력이 클때는 corona발생 영역이 좁아진 결과로 나타난다. 또한 유동개스 중에서 발생하는 과도 arc의 복잡한 손실기구인 에너지

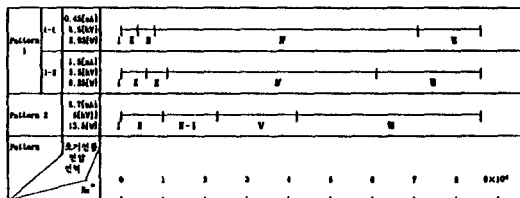


그림 9. 일정한 입력전력에서 방전 Pattern의 변화  
Fig. 9. Changes of discharge pattern for constant input power

지 평형의 일반식으로도 설명 가능하다.<sup>21)</sup>

$$(保有熱量) + (半徑方向으로의 對流損) + (軸方向으로의 對流損) + (膨脹冷却損) + (分子擴散損) + (亂流擴散損) + (放射損) = (電氣的 入力)$$

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

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

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

보유열량이 감소한다는 것은 arc가 일어나기 어려운 상태로 된다. 이런 현상이 심하면 심할수록 전로파괴는 corona영역으로 移行하기 쉽게 된다. 그 결과 그림 10에서와 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 더큰 결과 corona영역의 폭이 더욱더 좁게 나타남을 알 수 있다.

이 결과를 보면 Re의 조정에 의하여 氣體의 放電形式을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 結果式的 구성

그림10은 Re가  $0.7 \times 10^4 \sim 10.52 \times 10^4$ 까지의

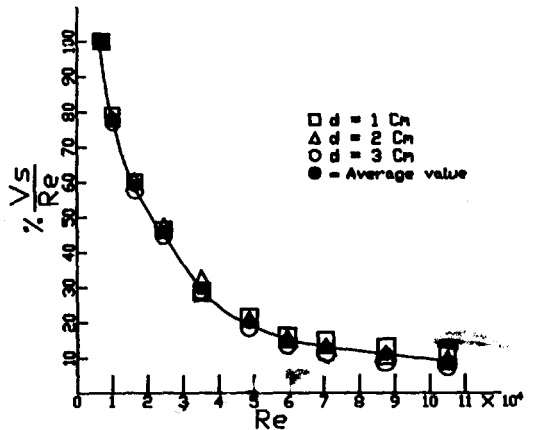


그림 10. [%]  $\frac{Vs}{Re}$  와 Re의 관계

Fig. 10. %  $\frac{Vs}{Re}$  · Versus Reynolds number

각 d를 파라메타로 한 전압 상승을 관계이다. 여기서 上昇率은 각 d에서  $Re=0.7 \times 10^4$ 에 대한  $V_s$ 의 비율을 100[%]로 하고 이에 대한 각  $Re$ 에서  $V_s$ 의 비율을 [%]  $\cdot V_s/Re$ 로 정의하였다.

그 특성은 그림10과 같이 지수적으로 감소한다. 이를 수식화하면 (11)식과 같이된다.

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

$$A = 10.2$$

$$B = 125$$

$$C = -4.66 \times 10^{-5}$$

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

### 5. 結 論

직원통관내 공기가 유동할때 負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 全路破壞電壓의 上昇率이 크며 그 후로는 완만한 경향을 거쳐 거의 포화된다.
- 2) Reynold數가 증가함에 따라 전로파괴지속시간(t)은 짧아 진다.
- 3) 全路破壞電壓은 流動時가 정지시보다 平均 6.3[kV]높았다.
- 4) 전압 上昇率의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

$$A = 10.2$$

$$B = 125$$

$$C = -4.66 \times 10^{-5}$$

5) 全路破壞時 ion풍이 유속분포에 준하여 하류에 분포되므로 이곳의 전계가 강화되어 유속분포에 준하는 방전로가 형성된다.

6) 초기입력전력을 일정하게 하고 전로파괴를 유지시킨후  $Re$ 를 변화시킨 결과, 초기입력전력이 적을수록 corona방전 지속시간이 길다.

7) Reynold수의 조정으로 氣體의 放電形式의 制御가 가능하다.

### 記 號 說 名

$V_s$  : 전로파괴전압

$Re$  : Reynolds number

$x, y, z$  : x축을 공기흐름 방향으로 취한 직각좌표

$U, V, W$  :  $x, y, z$ 에 있어서 속도성분

$P$  : 유로내 압력

$U_{max}$  : 최대 공기 유속

$U_{mean}$  : 평균 공기 유속

$l$  : 원통관과 同軸인 가상유체 원주길이

$\rho$  : 공기밀도

$\nu$  : 동점성계수 ( $1.65 \times 10^{-5}$ )

$\mu$  : 점성계수

$\lambda$  : 관마찰계수

$r$  : 가상 원주의 반경

$r_0$  : 관의 반경

$r_0$  : 전단용력

$d$  : 전극간 거리

$\Delta P$  :  $l$ 의 상부단면과 하부단면 사이의 압력차

$t$  : 전로파괴 지속 시간

$Q$  : arc보유열량

$P$  : 손실의 총합

$V_A$  : arc전압

$I_a$  : arc전류

$\frac{dQ}{dt}$  : 보유열량의 초당변화량

### 參 考 文 獻

- 1) 烏山 四男 外, 放電 ハソドブック, 電氣學會 昭和 55.
- 2) 川崎元之 外 1人, 電氣學會 論文誌, 59-A52(昭和 59)
- 3) 橋本清隆外 4人, 電氣學會 九州支部連合大會論文集, pp.229-230 昭和 48
- 4) 原 雅則, 電氣學會 論文誌, 55-A24昭和 55

- 5) 高城實外 3人, 電氣學會 放電研, ED83-25  
昭和 58
- 6) 石川孝司外 3인, 電氣學會 論文誌, 61-A20  
昭和 61
- 7) K. J. Nygaard, Journal of Applied Physics,  
Vol.37, No.7, 1966.
- 8) M.M.Kalifa, IEEE Transactions on power  
apparatus and system, Vol. PAS-86, No.3,  
1967.
- 9) M.M.Khalifa : IEEE paper, NO. C-73-163  
(1973)
- 10) Wolfgang, Flow visualization, Academic  
press, 1974.
- 11) M.Hara. IEEE Vol. pas-101, No.4, 1982.
- 12) K.Takaki, H.Akiyama, S.Maeda, T.IEE  
Japan, Vol. 110-A, No.2, 1990.
- 13) M.Abdel-Salam, IEEE Transaction on  
electrical insulation, Vol. EI-22, No.6, 1987.
- 14) Y.Sekiya, T.Hosokawa, K.haseba, T.IEE  
Japan, Vol.107-A, No.6, 1987.
- 15) 平山直道, 流體力學, 森北 出版, 1973.
- 16) 横山重吉, 水力學, パウ-社, 昭和 51年
- 17) Kwang-Sik Lee, T.KIEE, Vol. 34-12,  
pp.464~472, 1985.
- 18) Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee, T·  
KIEE, Vol 36-3, pp61~68, 1987.
- 19) Kwang-Sik Lee, Report of Institute of  
Industrial Technology Yeungnam Univers-  
ity, Vol. 12, No. 1, pp.161~166, 1984.
- 20) Yutaka Nishimura, Internal Combustion  
Engine. Vol. 17, No. 8, 1978.
- 21) Swanson. B. W, Roit. R. M, & Browne, T.  
E : IEEE, Vol. PAS89, No. 8, p.2033, 1970.