

이동인\* 이영호\*\* 최병주\*\* 김영배\*\*

The Effect of Wire-shaped Conducting Particles on the Breakdown Voltage in Compressed SF<sub>6</sub>

Dong-In Lee\* Hyeong-Ho Lee\*\* Byoung-Ju Choi\*\* Young-Bai Kim\*\*

Yeungnam Univ. Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

Investigations were made on the effects of wire-shaped conducting particles in compressed gas chamber on breakdown voltage.

The objective was to recognize the relationship between the length of wire-shaped conducting particles and a.c breakdown voltage. Also the influence of conducting particles on corona inception voltage and extinction voltage were investigated.

The values of breakdown voltage and corona inception, extinction voltages were calculated by wire shaped-conducting particles lengths.

1. 서 론

아주 이상적인 조건하에서 SF<sub>6</sub> 개스의 절연파괴강도는 어떤 이상치에 기대되지만, 대부분의 경우 절연system에 있어서 기기제작시의 환경오염 및 사용중의 기계적 마멸등에 의하여 입자들이 존재하게 된다.

입자의 종류로는 전기적 절연특성에 거의 영향을 끼치지 않는 절연성입자 및 전기적 절연특성에 크대한 영향을 끼치는 도전성 입자가 있다. 이중 SF<sub>6</sub> 개스 절연system에 있어서 도전성 입자의 존재는 절연성능을 상당히 감소시키므로(1-7), 이 분야에 대한 이유를 규명하기 위한 연구가 미국 MIT의 Trump, Doepkin(8)등에 의하여 시작되어, 1960년경에 이르러 도전성 입자에 의한 절연성능의 저하에 대한 연구가 본격화 되면서, 1970년부터 이분야의 연구가 활발히 진행중(9)에 있으나 국내의 경우는 거의 없는 실정이다.

도전성 입자들의 형태에는 자유운동형과 고정형의 2가지로 나누어지는데, 자유운동성 입자들은 정전기력과 입자의 운동성에 기인하여 절연파괴기구의 해석이 굉장히 복잡하기 때문에, 비교적 절연파괴 현상이 단순한 고정형 입자의 절연파괴 기구의 연구를 통하여, 자유운동성 입자

가 절연파괴기구에 미치는 영향에 대한 해석에 이용되고 있다(10).

압축개스의 breakdown 기구를 명확히 하고, 압축개스 절연기구의 설계에 필요한 자료를 얻기 위하여, 입자의 크기 및 모양, 전극의 기하학적구조, 절연개스의 종류와 압력, 인가전압의 파형등이 개스절연강도에 미치는 영향을 알 필요가 있다. A.C전압의 경우는 절연파괴전압이 입자의 모양 및 크기에 크게 의존한다(13).

입자의 영향에 기인된 breakdown 현상의 주요한 특성은 여러가지 요인으로 인하여 굉장히 복잡하다. 실제 system에 존재하는 입자들은 복잡한 모양, 크기 및 밀도로 구성되어 있기 때문에 이는 입자의 충전기구 및 전하손실 기구에 많은 영향을 준다. 또한 개스의 종류와 압력은 입자의 운동에 영향을 주며, 동축형 전극의 내부도체 주위의 고전계부에 입자들이 집중하게 된다. 또한 입자들 주위에 발생되는 코로나 현상은 개스종류, 개스압력, 입자들의 모양, 전계의 형태 및 인가파형에 의존하게 되는등 여러가지 복잡한 현상을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 이상의 여러가지 관점에서 SF<sub>6</sub> 개스 절연방식을 채택하고 있는 실계통에 가장 심각한 영향을 미치는 도전성 입자가 가스절연파괴에 미치는 영향 즉, 1)도전성 입자와 절연파괴전압, 2)도전성입자와 부분방전 발생 및 소멸과의 관계를 실험을 통하여 규명하였다.

2. 이론적 고찰

압축 SF<sub>6</sub> 개스를 이용한 개스절연기구의 대부분은 동축원통전극 형상을 이루고 있으며, 전극의 배치가 기중점과 같이 불명등전계 분포를 이루지 않기 때문에 그전계 분포는 코로나에 의한 공간전하의 영향을 받지 않는다. 따라서 이러한 전극배치에서는 절연파괴전압을 계산으로 구할 수 있다(13). 그러나 동축원통 전극의 내부에 wire형의 도전성 입자가 존재하면 전계분포는 불명등하게 된다. 전극과 입자사이의 작은 spark 방전은 입자가 전극에 접촉직전에 발생하는데 이것을 Microdischarge라고 부르며

코로나의 돌발을 수반한다.

입자의 절연파괴기구(Breakdown mechanism)는 여러 가지 제시되고 있는데(1-5) 아직 명확하지 않다. 일반적으로 절연파괴가 성립되기 위한 조건은 다음과 같다.

1) 방전개시조건

$$\int_{X_0}^{X_1} \alpha^n dx = k \dots\dots\dots(1)$$

2) 방전진전조건

$$E > Ec \dots\dots\dots(2)$$

여기에서,  $X_0$ : 갭중의 최대전계점  
 $X_1$ :  $\alpha = n$  (전계가 극한전계의 경우 성립되는 점)  
 $\alpha$ : 전리계수  
 $n$ : 부착계수  
 $Ec$ : 진전유지전계  
 $k$ : 전차사태의 공간전하 전계가 극한전계를 초과하게 될 경우의 값.

이다.

wire형의 긴도전성 입자가 전극에 접근하여 존재할 경우에는 입자전단의 고전계에 의하여 극부 Arc가 진전되기 쉽다. 불평형성을 가진 전계에서는  $\alpha$ (전리계수) <  $n$ (부착계수)의 조건이 성립되는데도 불구하고 절연파괴에 도달하는 것은  $\alpha > n$  인 미소공간에서 생긴 극부방전이 자기의 공간전하 전계에 의하여 진전되기 때문이다(13). 앞에서 제시한 절연파괴 성립조건중 식(1)의 방전개시조건은 비교적 인가전압이 낮은 경우에 만족되기 때문에 절연파괴의 발생여부는 식(2)의 방전진전조건에 지배된다(14). 따라서 방전이 진전하기 위하여 필요한 전계  $Ec$ 를 일정하다고 가정하면 최소절연파괴전압 ( $V_b$ ) =  $Ec$ (진전유지전계) x  $d$ (진전거리: 갭길이)  $\dots\dots\dots(3)$

의 관계에서 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

1) 실험장치

본 실험에 사용되는 실험장치에는, 고전압의 전원인 가장치로써 A.C 100KV-2200KVA의 Testing transformer (일본Mitsubishi Co. Ltd제작)를 사용하고, 시험용 gas chamber(Ø238 cm x H1200 cm, 8기압까지 시험가능)는 직접 설계제작한 원통형 압력 용기이며 진공제조장치는 진공도가  $10^{-6}$  Torr까지 가능한 국산제작품(한국진공(주) 제작)이다. 시험용 전극은 동축원통전극(Coaxial Cylindrical Electrode)이며, 외경 150[mm] 내경50[mm] 외부전극높이 360[mm]의 Stainless Steel로 만든 근사 Rogowski 전극인데 전하중첩법(CSM)으로 전계해석을 통하여 설계, 제작하였다. (그림1 참조) 그리고 절연파괴 전압은 Swiss Haefely Co. Ltd의 PVM

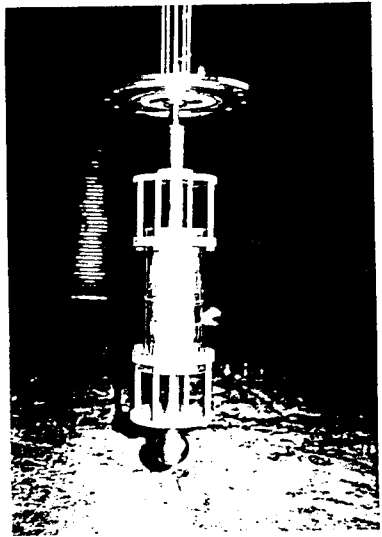
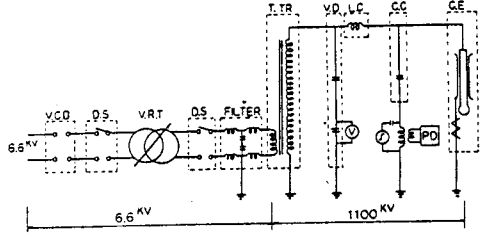


그림 1. 시험용 동축원통전극 및 일본 Mitsubishi Co. Ltd 의 capacitive divider (분압비 8000:1)을 사용하고 Oscilloscope 는 Tektronix 2430 A 및 468을 사용하였다. 부분방전발생 및 소멸전압을 측정하기 위하여 영국 Robinson Manchester Co. Ltd의 Discharge Detector Model 5(주파수 범위 10-300 KHz)를 사용하였다.

본 실험을 하기 위한 전기적 시험회로는 그림 2와 같다.



- V.R.T. : VOLTAGE REGULATING TRANSFORMER
- T.T.R. : TEST TRANSFORMER
- V.D. : VOLTAGE DIVIDER
- L.C. : LINE CHOKE
- G.C. : COUPLING CAPACITOR
- P.D. : PARTIAL DISCHARGE DETECTOR
- C.E. : COAXIAL ELECTRODE
- V : PEAK VOLT METER

그림 2. 전기적 회로

2) 실험방법

본 실험을 위한 시험조건에는 SF<sub>6</sub> gas의 압력은 4kg/cm<sup>2</sup>이며 인가전압은 A.C 상용주파전압, 입자는 운동성이 아닌 고정형 입자로서 직경 0.5 mm인 구리성분의 wire형 입자들 40mm, 30mm, 20mm, 10mm, 5mm, 3mm 길이로 자른후 각 입자의 끝부분이 동일한 시험조건이 되도록

Paper (#10,000)로 잘 손질한 후, 알콜을 이용하여 입자 주위의 불순물을 완전히 세정하였다. 전극의 표면에 입자를 부착시키기 위하여 도전성 알루미늄 테이프를 이용하였으며, 각 시료의 부착 후에는 Digital multimeter를 이용하여 입자가 전극표면에 완전히 접촉되었는가를 확인하였다.

절연파괴 시험시의 전압인가는 국제시험규격 IEC 60에 의한 방법으로 예상 파괴전압치의 75%까지는 급속히 상승시킨후, 그후 약 2%씩 상승시켜 각 시료마다 5회씩 시험을 실시하여 그 평균치를 취하였다. 또한 부분방전 개시 및 소멸전압 시험시의 전압인가는 IEC 270에 의하여 점차적으로 전압을 상승시켜 기준 부분방전량은 3pc (시험설비자체기준)로 기준하여 각 시료마다 5회씩 실시하여 그 평균치를 취했다.

본 실험에 사용된 입자가 전극내에서 부착된 형태는 그림 3과 같다.

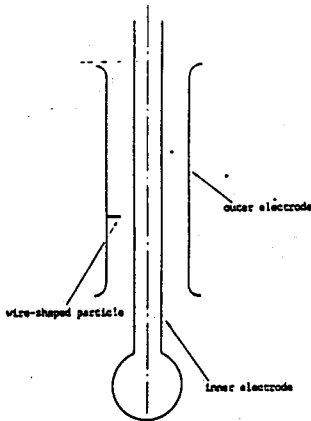


그림 3 외부원통전극에 부착된 입자의 외형도

4. 실험결과 및 고찰

1) 절연파괴전압에 미치는 입자길이의 영향

그림 4는 도체직경이 0.5mm인 wire형 도전성 입자의 길이를 3mm, 5mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm로 변화시키면서 각 시료에 대하여 5회씩 A.C 절연파괴시험을 실시한 결과를 나타낸다. 입자의 길이를 바꿔 전극내부에 부착시킬 때에는 시험용 챔버내 내부를 깨끗이 청소하고 10<sup>-1</sup> Torr까지 진공시킨후 시험을 실시하였다. 이와같이 wire형 도전성 입자가 압축 SF<sub>6</sub> 개스속에 존재할 경우의 절연파괴가 성립되기 위한 조건식에 대하여 검토하면 다음과 같다. 식 (3)에서 Vb=Ec x d 이고 본 실험에서 사용된 동축원통전극의 갭길이는 그림 1에서 알 수 있듯이 d=50-1이 된다. 따라서 Ec 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Ec = \frac{Vb}{50-1} \times 10(kV/cm) \dots\dots\dots(4)$$

입자의 길이 (l) 가 커지면 케질 수록 갭길이 d는 감소

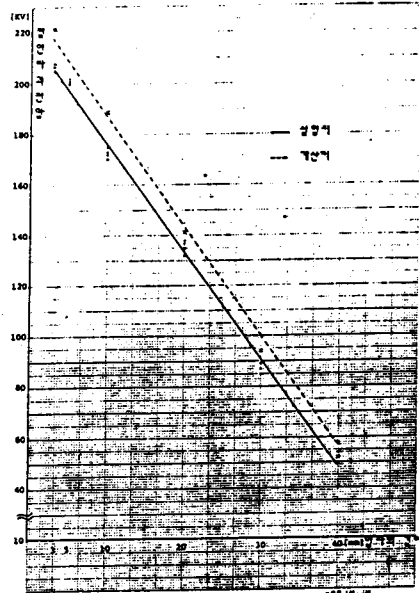


그림 4. 입자길이 (l)와 A.C 절연파괴전압 (Vb)의 관계 곡선

하므로 식 (3)에서의 절연파괴전압 Vb는 감소한다. 이러한 경향은 그림 4의 실험치 곡선이 감소하는 경향과 잘 일치한다.

절연파괴전압의 실험치 및 식 (4)를 이용하여 입자의 길이 (l:mm)에 대한 실험 갭길이 (d:mm), 방전전전유치전계 (Ec) 및 절연파괴전압 (Vb:kV)과의 관계를 구하면 표 1과 같다.

표 1. l, d, Ec 및 Vb와의 관계

입자의 길이 (l:mm)	3	5	10	20	30	40
실험갭길이 (d:mm)	47	45	40	30	20	10
방전전전유치전계 (Ec:kV/cm)	46.2	47.3	43	45.3	44.7	56.8
절연파괴전압 (Vb:kV)	217	213	172	136	89.4	56.8

표 1을 이용하여 방전유치에 필요한 평균전계 Ec 를 계산하면 Ec= 47.2kV/cm 가된다. Ec=47.2kV/cm 를 식 (4)에 대입하여 계산하면 그림 4의 점선과 같이 나타나는데 이 곡선은 실험치의 곡선과 거의 일치한다. 따라서 입자가 간경우(보통 l > 1mm)<sup>(14)</sup>에는 절연파괴가 식 (2)의 방전유치조건에 의하여 진행됨을 알 수 있다. 그림 4에 나타난 바와 같이 SF<sub>6</sub> 가스압력이 4kg/cm<sup>2</sup> 인 경우 동축원통전극의 외부전극(접지측)에 부착된 입자의 길이 (l:mm)과 A.C 절연파괴전압 Vb (kV)의 관계는 (-) 기울기를 가지면서 거의 직선적으로 변화한다. 표 1의 실험결과에 의하여 l (mm)과 Vb (kV)의 관계식을 최소자승법에 의하여 구한 결과는 식 (5)와 같다.

$$Vb = -4.1 \times l + 217.6 \dots\dots\dots(5)$$

식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Vb = a.1 + b \dots\dots\dots(6)$$

단,  $3\text{mm} < l < 40\text{mm}$

$\text{SF}_6$  gas압력 :  $4\text{kg/cm}^2$

$a=-4.1, b=217.6$

따라서 식(6)에 의하여 절연파괴전압은 입자의 길이와 길어질수록 거의 직선적으로 감소함을 알 수 있다.

2) 부분방전발생 및 소멸전압에 미치는 입자길이의 영향

부분방전 시험용 시료는 1)항의 절연파괴 시험용 시료와 동일한 것으로서, 절연파괴가 일어나지 않는 범위(절연파괴 전압치의 80%이하)에서 A.C 상용주파전압을 인가하였다. 부분방전발생전압 및 소멸전압은 시험장치의 부분방전량(back noise)인 3PC를 기준으로 측정하였다. wire형 입자의 길이 1(mm)에 대해서 측정된 부분방전발생전압  $V_I$ (KV), 및 소멸전압  $V_E$ (KV)를 나타내면 그림 5와 같다.

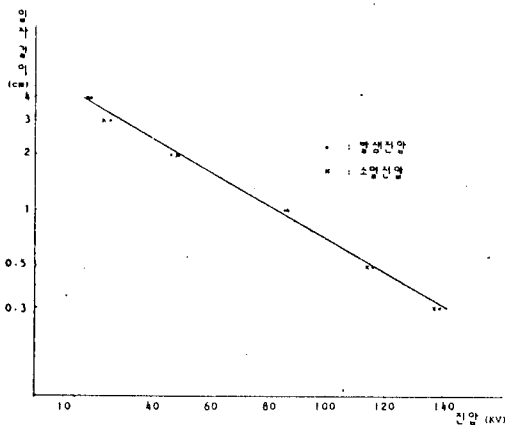


그림 5. 입자길이 (l)와 부분방전발생( $V_I$ ) 및 소멸전압( $V_E$ )

그림 5에 의하면 부분방전발생전압( $V_I$ ) 및 소멸전압( $V_E$ )은 거의 같은 관계곡선을 이루고 있으므로,  $V \propto V_I \propto V_E$ 로 1과의 관계식을 구할 수 있다. 입자의 길이 l과 V와의 관계식을 최소자승법을 이용하여 구하면 식(7)과 같다.

$$l = 54.321 e^{-0.02063V}$$

$$\text{즉, } V = -111.61 \log l + 193.6 \dots\dots\dots(7)$$

식(7)은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$V = c \cdot \log l + d \dots\dots\dots(8)$$

단,  $3\text{mm} \leq l \leq 40\text{mm}$

$\text{SF}_6$  gas 압력 :  $4\text{kg/cm}^2$

$C=-111.6, d=193.6$

따라서 식(8)에 의하여 부분방전발생 및 소멸전압(V)은  $\log l$ 에 대하여 직선적으로 변화함을 알 수 있다.

3) 부분방전발생 형태

wire형 입자가 동축연통전극의 외부전극(접지측)에 부착된 경우에 대하여 설명하면, (그림 6(a),(b) 참조) 전압을 zero에서 부터 상승시키면, 맨 처음 부분방전은 그림 6(a)에서와 같이 정극성에서 시작되어 점점 전압을 상승시키면, 그림 6(b)에서와 같이 부극성으로 부분방전의 극성이 바뀌었다. 부분방전 극성이 바뀌는 전압치는 표 1의 절연파괴전압 평균치의 25%-35%에서 나타났다. 더욱 전압을 상승(절연파괴전압치의 85%정도)시킨 후 서서히 하강시키면 부분방전이 부극성의 부분방전이 소멸된 후 그다음 정극성의 부분방전이 소멸되었는데, 이와 같이 극성이 바뀐 전압치는 전압상승시와 같이 절연파괴 전압평균치의 25%-35%였다.



그림 6(a) 정극성 부분방전발생에 (l=3cm)



그림 6(b) 부극성 부분방전발생에 (l=3cm)

5. 결 론

압축  $\text{SF}_6$  개스중에서 wire형 도전성입자가 A.C 절연파괴전압 및 부분방전발생 과 소멸전압에 미치는 영향에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) wire형 입자의 길이(l)가 길어지면 길어질수록 절연파괴전압( $V_b$ )는 l에 반비례하고 부분방전 발생 및 소멸전압은  $\log l$ 에 반비례 하였다.
- 2) 인가전압의 크기가 절연파괴 전압치의 25%-35% 범의에서 부분방전발생(정극성  $\rightarrow$  부극성) 및 소멸(부극성  $\rightarrow$  정극성)하는 극성이 바뀌었다. 따라서, 부분방전의 극성에 의하여 도전성입자의 존재 위치를 알 수

있다.

3) wire형 입자의 길이  $l$ 가 긴 경우(보통  $l > 1\text{mm}$ )의 절연파괴조건은 방전전전 조건식 ( $E > E_c$ )에 의하여 결정되었다.

4) 실효갭길이(갭길이-입자의 길이)와 실효절연파괴 강도 ( $= \frac{\text{절연파괴전압}}{\text{실효갭길이}}$ )간에는 아무런 상관관계가 없었다.

SF<sub>6</sub> and test methods for GIS"

[12] J.R.Laghari, A.H.Qureshi

IEEE EI 16-6, 1981.

"Areview of particle-contaminated gas breakdown"

[13] T.Takuma et al. CRIEPI보고서 종합보고 No.32, "SF<sub>6</sub> gas와 지지용 spacer의 절연특성" 1977.12.

[14] S.Ogata, M.Hara, 25-26. August-1988 Asian conference "입자오손 원추대 spacer의 교류파괴전압"

참 고 문 헌

[1] A.H.Cookson and O.Farish, "Particle initiated breakdown in compressed SF<sub>6</sub>", 1970 Annual Report. Conference on Electrical insulation and Dielectric Phenomena, NAS Publ. 1870, pp179-186, 1971.

[2] A.H.Cookson, O.Farish and G.M.L.Sommerman, "Effect of conducting particles on ac corona and breakdown in compressed SF<sub>6</sub>", IEEE Trans(Power, Apparatus and Systems), Paper No. 71-TP-PWR, 1971

[3] A.H.Cookson, and O.Farish, "Motion of spherical metal particles and ac breakdown in compressed SF<sub>6</sub>", 1971 Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.

[4] A.Diessner and J.G.Trump, "Free conducting particles in a compressed-gas insulated system", IEEE Trans. (Power Apparatus and Systems), vol. 89, pp1970-1978, 1970.

[5] A.H.Cookson, "Electrical breakdown for uniform fields in compressed gases", Proc. IEE, vol. 117, pp269-280, 1970.

[6] A.H.Cookson, Proceedings, first international symposium on gaseous dielectrics, knoxville, tennessee, 1978, pp286-313.

[7] J.C.Cronin, Proceedings, first international symposium on gaseous dielectrics, knoxville, tennessee, 1978, pp116-137.

[8] A.M.Cooksen et al. IEEE Trans, PAS-91, 1329, 1972.

[9] H.C.Doepkin, Ann. Rep. 1969 conf, on Electric insulation and dielectric phenomenon N.A.S. pub. No. 1964, 7, 1970.

[10] R.E.Wooton, A.H.Cookson et al. EL-1007, 1979 "Investigation of high voltage particle-initiated breakdown in gas-insulated systems"

[11] T.Hattori, M.Honda, H.Aoyagi, N.Kobayashi, K.Terasaka, IEEE PES 84wm 155-8, 1984

"A study on effects of conducting particles in