

# 平等電界中の 絶縁油에 미치는 添加物の 影響

論 文  
30~6~1

## A Study on the Effect of Additives in Insulating Oil under Uniform Electric Field

鞠 相 勳\*  
(Sang-Hoon Kook)

### Abstract

When electronegative gas SF<sub>6</sub> is dissolved and charged with insulating oil, the effect caused in the process by electronegative characteristic is studied, and also the pressure effect caused by electronegative SF<sub>6</sub> acting on the liquid-level is examined respectively.

When inert gas Ar is used to find a pressure effect acting on the liquid-level, its effect on dielectric strength is considered in the experiment.

With three kinds of impulse voltage different in the duration of wave front and wave tail, a brief experiment is carried out to see the effects on the dielectric breakdown characteristic as the wave is changing; either if I<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> are added to the insulating oil, or if the oil pressure is increased by Ar the dielectric strength becomes great and the longer the duration of wave front is, the greater the increase of the breakdown voltage, because I<sub>2</sub> added by a small quantity brings about some hinderance in the formation of gas phase.

Likewise, the greater the changed pressure is, the greater the increase of the breakdown voltage. When SF<sub>6</sub> is charged, the electronegative characteristic is prevailing at the time of low balanced pressure, and the pressure effect at the time of high balanced pressure.

### 1. 緒 論

液體絶縁油의 絶縁破壊機構에 관해서는 以前부터 많은 연구가 행하여져 왔는데<sup>(1)</sup> 液體속에 들어 있는 不純物이나 溶解가스의 영향 또는 電極表面狀態의 영향이 强하여 再現性있는 結果를 얻기가 힘들며 따라서 確固한 破壞理論이 세워져 있다고는 말할 수 없다. 또한 液體絶縁物에 미치는 封元氣體의 영향에<sup>(2-4)</sup> 있어서도 아직까지 氣體의 平衡壓力과 破壞電壓 설명에 있어서 不明確한 점이 있고 하물며 液體絶縁物에 어떤 종류의 가스들을 용해시킨 경우의 絶縁耐力에 대한 연구는 그다지 볼 수가 없다.

本 研究는 이 점을 고려하여 實用되고 있는 絶縁油에

電氣의 負性氣體, 不活性氣體, 電氣의 負性物質을 첨가시키고 이들 첨가물이 絶縁油의 絶縁破壊特性에 미치는 영향을 考察하여 絶縁油의 絶縁破壊機構를 解明하려는 것이다. 本 實驗에 있어서는 絶縁油에 우수한 氣體絶縁材料로서 사용되고 있는 電氣的 負性氣體 六弗化硫黃(SF<sub>6</sub>)을 溶解封入한 경우의 絶縁耐力特性에 대하여 主로 實驗的研究하였다. 그 結果 絶縁油에 SF<sub>6</sub>가스를 첨가시킨 效果로서 液面에 作用하는 SF<sub>6</sub>가스에 의한 壓力效果和 溶解된 SF<sub>6</sub>에 의한 電氣的 負特性에 起因하는 效果 이 두 效果가 想定되었다. 이들 兩效果를 分離解明할 目的으로 不活性氣體알곤(Ar)을 사용하여 液面에 作用하는 壓力만을 갖는 效果和 電氣的 負性物質, 沃素만을 溶解시키므로써 電氣的 負特性에 起因하는 效果를 각각 實驗檢討하여 絶縁油에 SF<sub>6</sub>가스를 溶解封入하였을 경우의 絶縁耐力에 미치는 영향을 研究하였다. 또 波頭長 波尾長이 다른 3종류의 衝擊電壓을

\* 正會員: 朝鮮大 工大 電氣工學科 教授  
接受日字: 1981年 4月 8日

사용하여 波形變化가 絶緣破壞特性에 어떻게 영향을 미치는가도 實驗檢討하였다.

### 2. 實驗裝置 및 實驗方法

#### 2.1 實驗裝置

本 實驗에 사용한 電極은 16mmφ의 스테인레스鋼球 電極이고 Gap길이는 Imm로 일정하게 하였다. Test Cell을 그림 1에 표시하는 排氣系에 접속시키고 먼저 試料를 넣지 않고 진공도 10<sup>-5</sup>torr로 排氣시킨 후 市販變壓器絶緣油를 유리필터(Glass Filter)로 3회 이상 진공여과(吸藏가스와 먼지除去)시킨 것을 넣었다 絶緣 유 교환은 容器 양쪽에 붙어있는 Ball Joint를 이용하였다.

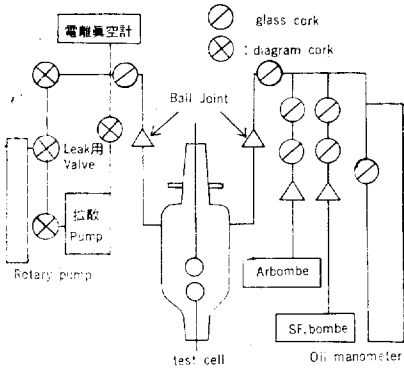


그림 1. 진공유리계 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block Diagram for Vacuum Glass System

#### 2.2 實驗方法

처음 絶緣油를 Filter로 진공여과 시키고 그것을 Test Cell에 400cc 넣고 약 30分間 Rotary Pump 만으로 脫氣시킨다. 이 사이에 超音波洗淨器는 發振周波數 400KHz 出力 200W로 걸어 놓는다. 위 操作後에 Pump를 정지시키고 약 12시간 가스를 빼낸다. 다음 이것을 擴散 Pump와 超音波洗淨器로 攪拌 및 電極處理를 하면서 眞空脫氣를 시킨다. 이때 진공도는 10<sup>-5</sup> torr이상 이 된다. SF<sub>6</sub>封入는 脫氣를 마친 時點에서 SF<sub>6</sub>가스를 소정량 封入시키고 이것을 25시간 방치하였다가 다시 超音波洗淨器로 30분간 低出力으로 攪拌시킨 후에 實驗하였다. Ar封入의 경우는 진공도 10<sup>-5</sup> torr 이상 되었을 때 脫氣를 정지시키고 Ar을 所定量 封入시켜 즉시 實驗을 開始하였다. 다음 沃素의 경우는 大략의 진공을 시킨 단계에서 所定量의 沃素를 넣

고 그 후는 Ar封入때와 똑같은 方法으로 脫氣시키고 진공도가 10<sup>-5</sup>torr 이상에 達했을 단계에서 實驗을 開始하였다.

電源은 最大 300kV인 衝擊電壓發生器를 사용하였고 波頭調整에는 各種 抵抗 인덕턴스 컨덴서를 써서 規約 波頭長 1.1μS(1.6×40μS) 8μS(12.5×400μS) 73μS(100×1,450μS)의 3종류 波頭長에 대하여 각각 실험하였다. 以後 各波形을 1μS波 10μS波 100μS波로 부르자

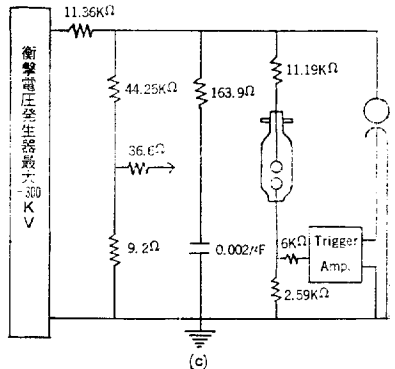
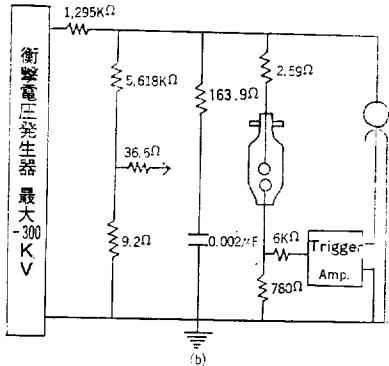
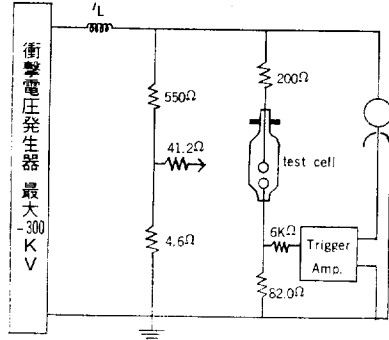


그림 2. (a) 1μS波 發生回路  
(b) 10μS波 發生回路  
(c) 100μS波 發生回路  
Fig. 2. (a) Generation Circuit of 1μS Wave  
(b) Generation Circuit of 10μS Wave  
(c) Generation Circuit of 100μS Wave

로 한다.

실험회로를 그림 2 (a)(b)(c)에 표시하였는데 회로에는 保護回路를 넣어 破壞時의 續流을 방지시켜 기름의 劣化를 방지한다.

측정은 파파를 전혀 이르키지 않는 전압부터 시작하여 전압을 數kV씩 증가시켜 파파가 일어날 것 같으면 다시 전압을 내린다. 이 操作을 3往復 되풀이 하였고 1 $\mu$ S波에 대하여는 각 破壞때마다 사진을 찍어 그것으

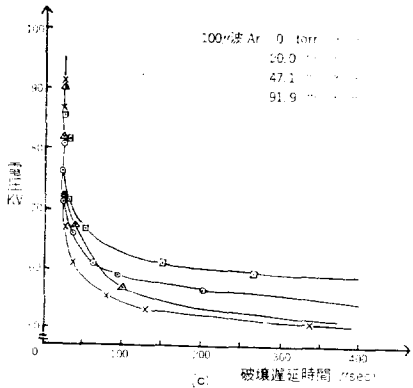
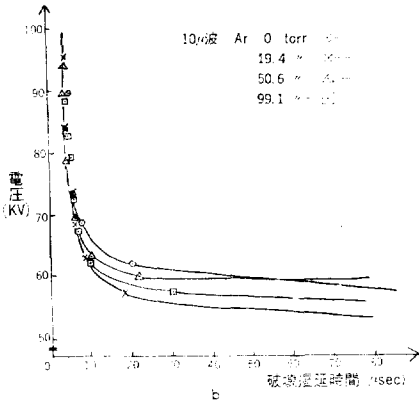
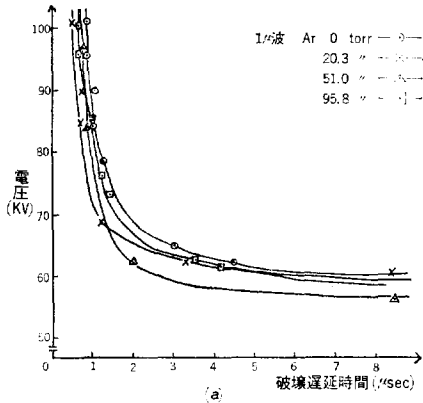


그림 3. Ar 封入時 V-t曲線  
Fig. 3. V-t Curve when Ar is Charged

로부터 破壞遲延時間을 읽는다. 10 $\mu$ S波 100 $\mu$ S波에 대하여는 殘像을 이용하여 Oscilloscope로 직접 읽을 수가 있었다. 각 破壞遲延時間을 전압에 대하여 plot 하고 形成遲延에 가장 가깝다고 생각되는 최소 파괴 지연시간으로부터 V-t곡선을 求하였다.

### 3. 實驗結果 및 檢討

#### 3.1 壓力의 效果

그림 3 (a)(b)(c)는 Ar을 封入하였을 경우의 V-t곡선이다. 이 V-t곡선에서 求한 각 파형의 實波頭長에서의 破壞電壓과 Ar封入의 關係를 표시한 것이 그림 4이다.

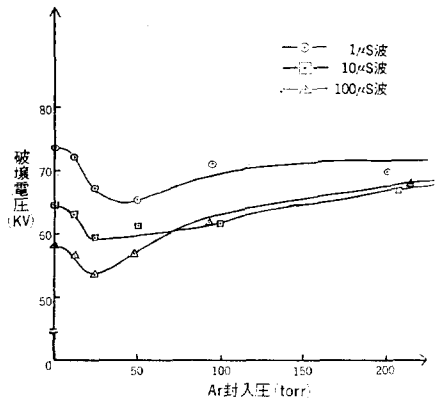


그림 4. 破壞電壓—Ar封入壓 特性  
Fig. 4. Characteristics of Breakdown Voltage—Ar Charged Pressure

Ar은 不活性氣體이기 때문에 絶縁油 중에 용해되었다고 가정하여도 전기적인 작용은 없고 油面에 가해지는 壓力效果만이라고 생각된다.

그림 4의 Ar封入壓—破壞電壓特性은 처음엔 Ar封入壓증가에 따라 파괴전압은 감소하고 어떤 최소치에 달한 후 다시 증가하는 파괴전압의 壓力依存性을 보여 주고 있다. 또한 波頭長이 길수록 최종적인 파괴전압의 증가가 현저하다는 것을 알 수 있다. 이 破壞電壓의 壓力依存性은 액체가 비압축성이므로 絶縁油의 破壞機構過程에서 氣相의 存在와 그 影響을 表示하고 있다고 생각된다. 또 絶縁油와 氣相의 誘電率이 다르기 때문에 氣相中の 電界集中이 일어나고 氣相이 절연유보다 絶縁耐力이 낮기 때문에 氣相의 파괴가 먼저 일어나고 그것이 기름의 全路破壞原因이 된다는 것이 쉽게 理解된다. 또 氣相중의 절연과파는 당연히 Paschen法則이 응용될 것이다.

이상과 같이 생각할 때 실험에서 얻어진 파괴전압의

최소값은 氣泡 성분중에서의 Paschen곡선의 최소값에 대응한다고 생각된다. 따라서 여기서는 절연유중의 氣泡에 법칙을 적용하므로써 그 氣泡의 直徑을 算出하여 보기로 한다.

본 실험에서는 충분히 脫氣시킨 絶緣油를 사용하였고 Ar封入 후 즉시 실험하였으므로 기름속에 용해되어 있는 氣體는 없다고 생각된다. 또 絶緣破壞時에 발생하는 가스성분의 대부분은 水素라는 것이 알려져 있다.<sup>5)</sup> 따라서 여기서는 氣相이 모두 水素라고 가정하였다. 水素가스중에서 Paschen곡선의 파괴전압최소치에 대응하는  $P \cdot d$ 積은 12mm-torr이다.<sup>6)</sup>

지금 유전율  $\epsilon_2$ 의 氣泡가 유전율  $\epsilon_1$ 의 액체중에 존재할 때 그 氣泡의 任意表面에서 다음 식이 성립한다.

$$P_{i,a} = P_0 + P_s + P_e \quad (1)$$

$P_{i,a}$ : 氣泡의 内部壓力

$P_0$ : 靜水壓的인 外部壓

$P_s$ : 表面張力에 의한 壓力

$P_e$ : 電界중에 유전율이 다른 유전체가 존재할 때 그 界面에 作用하는 電界에 의한 壓力(유전율이 큰 유전체로부터 작은 유전체로 작용)

$P_e$ 의 영향 때문에 電界를 印加할 때 기름의 氣泡는 電界方向으로 늘어서 橢圓球形으로 되는 것이 理論的으로 유도되고 있다.

氣泡는 電界方向을 軸으로 하는 回轉橢圓體이므로  $z$ 軸을 電界方向으로 하였을 때 氣泡의  $x-z$ 平面에서의 斷面圖는 그림 5로 표시된다. 그림에서 任意點  $x, z$ 의 電界에 의한 압력  $P_{e,a}$ 는

$$P_{e,a} = \frac{E_2^2 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{8\pi\epsilon_1} [\epsilon_2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2) \sin^2 \alpha] \quad (2)$$

로 표시된다.<sup>7)</sup> 또 表面張力에 의한 압력  $P_{s,a}$ 는

$$P_{s,a} = s \cdot c_x \quad (3)$$

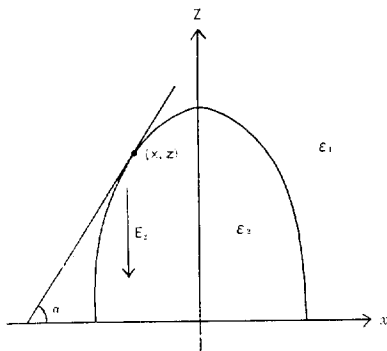


그림 5. 氣泡의  $x-z$ 平面斷面圖  
Fig. 5.  $x-z$  Cross Sectional View of Bubble

로 표시된다.  $s$ 는 油-氣泡界面에서의 표면장력  $c_x$ 는 점  $x, z$ 에서의 曲率이다. 橢圓球體에서는 계산이 복잡해지므로 氣泡가 球라고 생각하여 氣泡크기를 概算한다. 氣泡内部的 電界  $E_2$ 는 평등하고 氣泡는 直徑이  $d$ 인 球라고 가정한다(그림 6 참조).

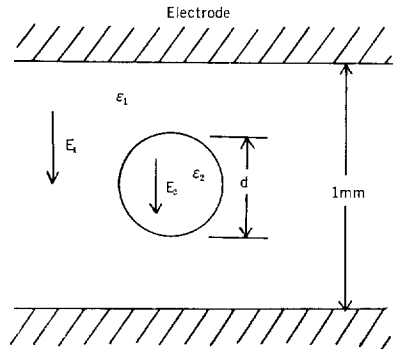


그림 6. 氣泡球의 内部電界와 直徑  
Fig. 6. Internal Electric Field of Bubble Globe and Diameter

식 (1)의 제 1항  $P_0$ 는 Ar封入壓과 油面에서 氣泡表面까지의 油面高에 의한 압력과 의 합이라고 생각된다. 기름에 의한 압력은 氣泡各部分에서 다르지만 氣泡가 미소하기 때문에 油面에서 Gap 중앙까지의 油面高에 의한 압력과 같다. 또 球의  $P_s$ 는

$$P_s = \frac{4s}{d} \quad (4)$$

로 주어진다. 表面張力  $s$ 는 絶緣油水素가스 界面에서 대략 30dyne/cm이며 따라서

$$P_s = 0.91/d \text{ torr} \quad (5)$$

가 된다. 제 3항  $P_e$ 를 정확히 결정한다는 것은 극히 곤란하므로 다음과 같은 가정을 하고 결정한다. 氣泡의 極(電界方向)에서의 미소부분에서는 평등전계중에서 유전율  $\epsilon_1$ 인 유전체중에 유전율  $\epsilon_2$ 인 平行誘電體를 삽입한 경우라고 생각해도 된다. 따라서 極에 있어서는 다음 식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} E_2 \cdot d + E_1(1-d) &= V \\ E_1 \epsilon_1 &= E_2 \epsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

단  $V$ : Gap사이의 인가전압

따라서 식(6)에서

$$E_2 = \frac{V}{\{d(1-\epsilon_2/\epsilon_1) + \epsilon_2/\epsilon_1\}} \quad (7)$$

식(1) 식(7)에 의하여 極에서의 전계에 의한 압력  $P_{e,t}$ 는

$$P_{e,t} = \frac{V^2}{8\pi \{d(1-\epsilon_2/\epsilon_1) + \epsilon_2/\epsilon_1\}^2} \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (8)$$

본 실험에 사용한 기름과 수소의 유전율비  $\epsilon_2/\epsilon_1$ 는 2.0이다<sup>(7)</sup>. 따라서 식(8)은

$$P_{e,s} = \frac{V^2}{(1+d)^2} \times 2.68 \times 10^{-9} \text{ torr} \quad (9)$$

그러므로 極에서의 氣泡内部壓力  $P_{i,n}$ 는

$$P_{i,n} = P_0 + \frac{V^2}{(1+d)^2} \times 2.68 \times 10^{-9} + \frac{0.91}{d} \text{ torr} \quad (10)$$

가 된다. 氣泡內的 파괴는 極軸方向(전계방향)에서 일어난다고 생각되며 따라서 氣泡內에 Paschen법칙을 적용시킬 때  $P \cdot d$ 積의  $d$ 는 氣泡의 極直徑이며  $P$ 는 氣泡의 内部壓  $P_{i,n}$ 으로 置換할 수가 있다. 따라서

$$12 = \left\{ P_0 + \frac{0.91}{d} + \frac{V^2}{(1+d)^2} \times 2.68 \times 10^{-9} \right\} d \quad (11)$$

가 성립한다. 식(11)은 정리하면

$$P_0 d^3 + (2P_0 + 11.09)d^2 + (P_0 + V^2 \times 2.68 \times 10^{-9} - 22.18)d - 11.09 = 0 \quad (12)$$

식(12)에  $P_0$  및  $V$ 를 대입하여 풀면 氣泡의 크기가求해진다. 여기서  $d$ 는 1보다 적은 것으로  $d^3$ 항을 무시하여 2차식으로  $d$ 를 구한다. 따라서

$$(2P_0 - 11.09)d^2 + (P_0 + V^2 \times 2.68 \times 10^{-9} - 22.18)d - 11.09 = 0 \quad (13)$$

그림 4의 破壞電壓—Ar封入壓特性關係에서 曲線의 最小點의 Ar封入壓과 破壞電壓은 1 $\mu$ 波 10 $\mu$ 波 100 $\mu$ 波 각각 40torr 64kV, 25torr 59kV 20torr, 54kV이다. 또 torr로 換算한 기름의 壓力은 5.3torr이다. 따라서 各波形的  $P_0$ 는 45.3 torr, 30.3torr, 25.3torr가 된다. 이상의 값을 사용하여 식(13)에서 求한  $d$ 의 값은 1 $\mu$ 波 10 $\mu$ 波 100 $\mu$ 波 각각 0.22mm, 0.33mm, 0.41mm였다. 이 값은 Mirza가 求한<sup>(8)</sup> 破壞前驅現象에서 氣泡의 크기가 0.03~0.4mm 정도라는 것과 거의 近似한 값을 보여주고 있다.

이상 계산은 氣泡를 球로 생각한 값이고 실제로는 楕圓球과 같이 橢圓球이고 그 極軸 赤道軸의 比는 大約 極 및 赤道에서 電界에 의한 壓力  $P_e$ 의 比로 결정된다고 생각된다.

식(3)에서 極 및 赤道에서 電界에 의한 壓力  $P_{e,s}$ ,  $P_{e,n}$ 는 각각

$$\left. \begin{aligned} P_{e,s} &= \frac{E^2}{8\pi} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \\ P_{e,n} &= \frac{E^2}{8\pi} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

이며 결국 그 比는 유전율比와 같고 따라서 極軸과 赤道軸의 比는 2:1정도가 되는데 실제로는 表面張力 때문에 그것보다 적어진다고 생각된다. 어떻든간에 極軸은 球로 생각하여 求한 값과 같더라도 赤道軸은 그것보다

적고 따라서 氣泡의 體積은 球로 생각한 크기의 數分の 1이라고 생각된다.

지금까지의 계산 결과 어떤 原因으로 形成된 絶縁油中の 氣泡의 크기는 波頭長이 길수록 크다는 것을 알게 되었다. 氣相形成의 原因으로서는 熱的인 것과 高에너지를 갖는 電子에 의한 것이 생각된다. 兩者는 同時에 이루어진다고 생각된다.

熱的인 原因은 絶縁유에 흐르는 電流가 파괴에 이를 때까지의 열에 의해서 油分子가 解離되어 發生하는 것으로 당연히 長波頭的 波形일수록 熱的으로 發生하는 氣體의 量도 많아진다. 한편 陰極에서 放出된 電子나 油中에 偶存하는 電子가 電界에 의해서 加速되어 局部的인 전자사태를 형성하면서 高에너지를 얻는다. 이 高에너지를 갖는 전자가 油分子에 충돌하므로써 油分子를 電離시키고 水素分子나 다른 低分子를 發生시킨다는<sup>(5)</sup> 過程이라는 것이 생각된다. 이것이 電子에 의한 것이다. 이와같은 機構로 發生한 가스분자가 기름의 극부적인 용해도를 넘게 되면 油中에서 氣相化하여 氣泡가 發生한다. 이와 같은 氣相形成過程에서는 당연히 電界印加時間이 길수록 形成되는 氣體분자는 많아진다는 것이 예상되며 또 極부적으로 發生하여 미처 파괴까지는 이르지 않은 미소한 氣泡가 서로 충돌하여 성장하는 것도 전계인가시간이 길수록 일어나는 確率은 증가된다고 생각된다.

長波頭的 波形은 전계인가시간이 긴 것에 다름없으므로 실험결과는 쉽게 설명된다. 또한 發生한 氣泡가 많아지면 압력효과는 현저히 나타나며 따라서 波頭長이 길어지면 최종적으로는 파괴전압증가를 초래할 것이라고 생각된다. 어느 경우는 氣泡가 어떤 크기로 성장하여 氣泡內에서 파괴가 일어난다. 氣泡内部의 파괴는 氣相의 電離를 일으키고 氣相의 電離가 일어나면 Coulomb힘에 의하여 氣泡는 電界方向으로 급속히 끌려 늘어나서 가스 Channel化되어 Gap間을 橋絡시킨다.<sup>(6)</sup> 이로 因하여 기름의 全路破壞가 된다고 생각된다.

### 3.2 電氣的 負性物の 影響

그림 7 (a)(b)(c)는 沃素添加한 경우의 V-t곡선을 표시한 것이며 그림 8은 이들 V-t곡선에서 求한 各波形的 實波頭에서의 파괴전압과 沃素添加量과 關係를 표시한 것이다. 沃素添加時는 油中에 용해되어 있는 沃素의 效果뿐이고 油에 가해진 압력은 10<sup>-3</sup>torr로 일정하며 그 效果는 없다. 그림 8에서와 같이 各波形的 沃素添加量—破壞電壓特性이 같은 傾向을 나타내고 있다. 즉 沃素添加量이 증가하면 各波形的은 모두 파괴전

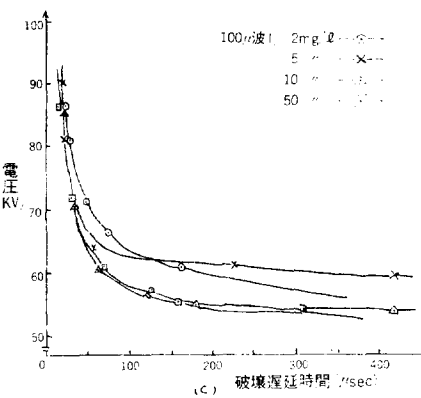
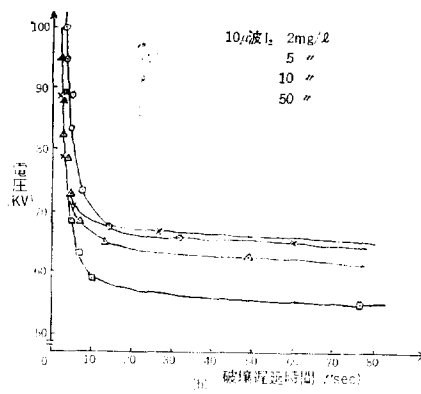
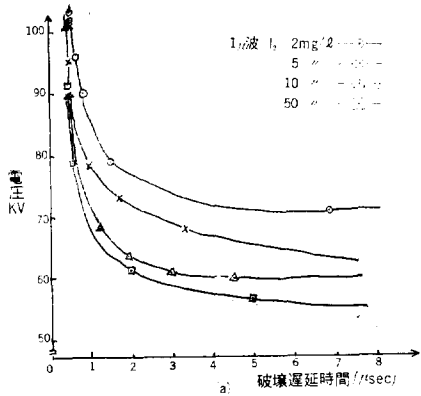


그림 7. I<sub>2</sub>添加時 V-t曲線  
 Fig. 7. V-t Curve when I<sub>2</sub> is Added

압이 상승하여 최대치가 되며 또 다시 沃素量을 증가시키면 파괴전압은 하강하기 시작하여 포화치로 되는 특성을 나타낸다. 또한 각 波形은 다같이 2mg/l의 沃素添加量일 때 파괴전압은 최대치가 되는 것을 알 수 있다.

이 특성은 다음과 같이 설명된다. 沃素는 電子親和力이 크고 電子를 捕捉하여 負이온을 형성하고 그 이온은 안정하게 존재할 수가 있다. 그 捕捉되는 電子는

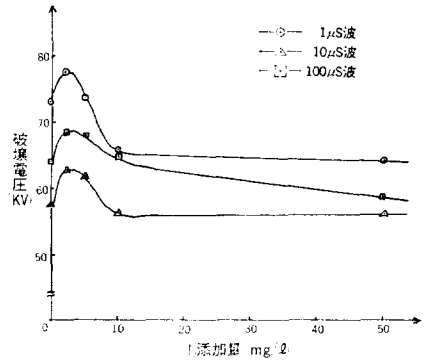


그림 8. 破壞電壓-I<sub>2</sub>添加量特性  
 Fig. 8. Characteristics of Breakdown Voltage -I<sub>2</sub> Added Quantity

電界를 印加하였을 때 陰極에 방출되는 電子 또는 Gap間油中에 偶存하는 電子이고 이 電子는 宇宙線에 의해서 油分子가 電離하여 발생된 것이라고 생각된다. 어느 경우에 있어서나 沃素가 電子를 捕捉하면 初期電子數는 부족하고 전자사태의 형성을 방해시킨 결과 氣相의 발생은 沃素를 첨가하지 않을 때보다 감소된다고 생각된다. 따라서 기름의 全路破壞는 일어나기 어렵게 되는데 이것은 소량의 沃素를 첨가한 경우의 파괴전압 상승을 일으키는 원인이 된다. 또 한가지 원인이 있는데 正이온의 空間電荷層의 영향이다. 즉 Gap間的 電界分布는 平等電界中에 있어서도 일정하지 않고 음극근방에 強電界部分이 존재하며 이것은 正의 空間電荷層에 의한 것이고 이 正의 空間電荷層은 음극에서 방출된 電子가 油分子에 충돌하여 電離을 일으켜서 발생한 正이온이나 우주선에 의해서 電離되어 발생한 正이온으로 구성되어 있으며 이 正의 空間電荷는 음극에서의 電子放出을 쉽게 하여 氣相發生을 촉진시킨다. 그러나 이 상태에 沃素를 첨가하므로서 沃素가 電子를 捕捉하여 負이온이 되면 음극근방의 正空間電荷를 中和시켜 음극 부근의 전기적 켜그러짐을 없애어 파괴전압의 상승을 가져오게 하는데 이 두 機構가 서로 어울려서 소량의 沃素添加時 破壞電壓上昇을 일으킨다고 생각된다.

그러나 最適沃素添加量을 넘게 되면 그 沃素 때문에 負이온이 많이 생성되어 이 負이온이 空間電荷를 만들어 처음의 경우와 반대로 陽極側에서 전기적 켜그러짐이 생겨 強電界部의 部分放電을 쉽게 하므로 파괴전압 강하를 일으킨다고 생각된다.

다음에 50mg/l의 沃素를 첨가할 때의 첨가하지 않

을 때에 대한 파괴전압강하는  $1\mu\text{S}$ 波  $10\mu\text{S}$ 波  $100\mu\text{S}$ 波 각각  $9\text{kV}$   $6\text{kV}$   $1.3\text{kV}$ 로 波頭長이 길어질 수록 강하는 전압이 작아지는 것을 검부한다. 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다.  $1\mu\text{S}$ 波에서는 급속히 電界가 상승하기 때문에 電界에 의해서 電子의 속도도 電子放出 때보다 급속히 상승하며 그 결과 전자가 捕捉되어 형성되는 負空間電荷層은 음극에서 넓게 분포된다고 생각된다. 그러나 波頭長이 증가하면 電界의 상승속도는 감소하

여 電子放出시 放出電子의 에너지는 적다. 따라서 電子는 음극부근에서 沃素分子에 捕捉되어 이온화되는 확률이  $1\mu\text{S}$ 波보다 높다고 생각된다. 일단 負空間電荷層이 음극 부근에서 형성되기 시작하면 그 후의 放出 電子의 加速이 충분치 못하고 따라서 波頭長이 긴 波形일수록 大量沃素添加時의 負空間電荷層은 음극부근에 형성되는 것이 되며 負空間電荷가 음극부근에 형성되면 음극에서 방출되는 電子數는 제한된다. 즉 氣相의 發生은 제한된다. 이상과 같이 波頭長이 긴 波形일 수록 最適沃素添加量을 넘은 다음의 破壞電壓降하는 적다고 생각된다.

### 3.3 SF<sub>6</sub>의 영향

그림 9 (a)(b)(c)는 SF<sub>6</sub>를 封入한 경우의 V-t곡선을

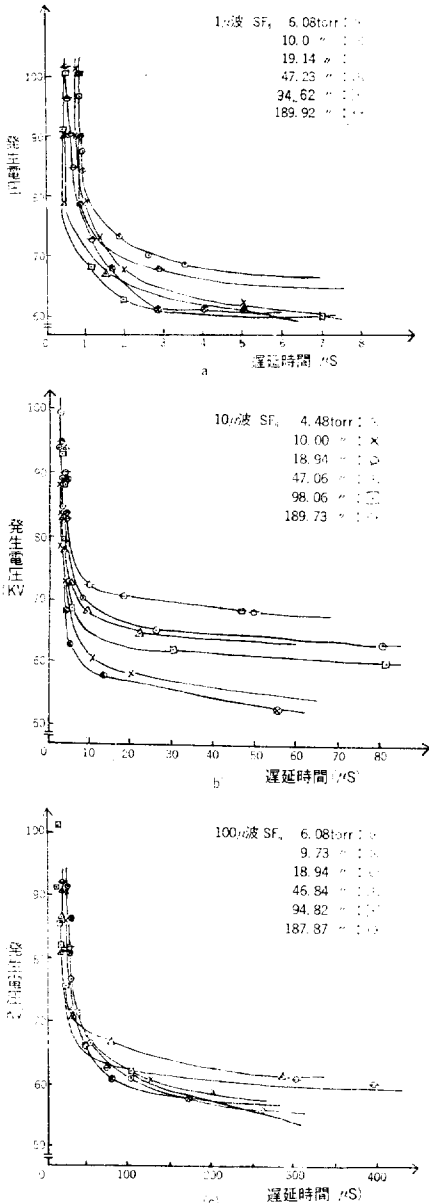


그림 9. SF<sub>6</sub>封入時 V-t曲線  
Fig. 9. V-t Curve when SF<sub>6</sub> is Charged

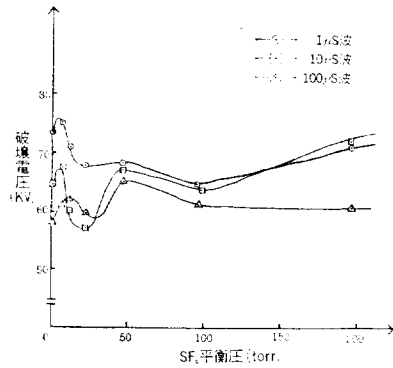


그림 10. 破壞電壓—SF<sub>6</sub>平衡壓 特性  
Fig. 10. Characteristics of Breakdown Voltage —SF<sub>6</sub> Balanced Pressure

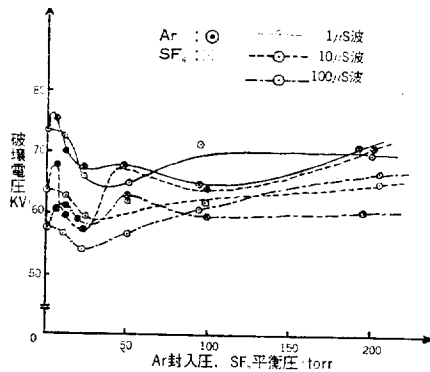


그림 11. 破壞電壓—Ar封入壓, SF<sub>6</sub>平衡壓特性  
Fig. 11. Characteristics of Breakdown Voltage —Ar Charged Pressure, SF<sub>6</sub> Balanced Pressure

표시한 것이며 그림 10은 각파형의 實波頭에서의 파괴 전압과 SF<sub>6</sub>의 平衡壓과의 관계를 표시한 것이다. 또 그림 11은 각 파형의 Ar封入壓과 SF<sub>6</sub>封入壓경우의 파괴전압특성을 비교한 것이다. SF<sub>6</sub>를 封入한 경우는 SF<sub>6</sub>가 전기적 부성기체이므로 油에 가해지는 壓力效果와 동시에 SF<sub>6</sub>가 용해되므로서 電氣的負特性을 나타내는 效果 이 두가지가 동시에 작용된다고 생각된다. 즉 Ar과 I<sub>2</sub> 두가지를 동시에 添加한 것과 類似하다. 단 어느 平衡壓에서 溶解되어 있는 SF<sub>6</sub>의 電氣的負特性物質의 작용이 沃素添加量에 대하여 어느만큼의 量에 해당하는가를 決定지을 수 없다. 그러나 平衡壓이 증가하면 용해되는 SF<sub>6</sub>의 量도 많아지는 것은 틀림이 없고 따라서 電氣的負性物로서 작용하는 SF<sub>6</sub>量도 많아진다고 생각된다.

또한 定常狀態에서 I<sub>2</sub>가 固體인데 SF<sub>6</sub>는 氣體이므로 용해된 SF<sub>6</sub>의 再氣相化에 의한 영향을 생각해야 할 것이다.

그림 10에서 破壞電壓-SF<sub>6</sub>平衡壓特性은 Double peak特性을 보여주고 있다. 각 파형의 제 1 peak는 모두 3~10torr의 SF<sub>6</sub>平衡壓時에 존재하며 제 2 peak는 모두 50torr부근에 존재하고 있다. 또 1μS波에서는 SF<sub>6</sub>平衡壓(0~200torr)에서 제 1 peak 이외의 파괴전압이 모두 SF<sub>6</sub>를 封入하지 않았을 때의 파괴전압보다도 낮고 이와 반대로 100μS波에서는 SF<sub>6</sub>封入의 파괴전압이 모두 붕괴하지 않을 때보다 상승하고 있다. 10μS波에서는 그 中間에 속하고 제 1 peak와 제 2 peak 이후의 平衡壓時의 파괴전압은 封入하지 않을 때보다 상승하고 있다. 이상의 실험결과에서 SF<sub>6</sub>封入에 의한 파괴전압의 증가는 波頭長이 길어질수록 현저하게 나타나고 있다. 그러나 어느 波形에서도 Double peak 특성을 갖고 있는 것은 변함이 없다.

이 Double peak 특성에서 제 1 peak에 이를 때까지의 파괴전압의 상승은 용해되어 있는 SF<sub>6</sub>의 전기적부성물의 效果가 지배적이라고 생각된다. 이때 압력효과에 의한 파괴전압감소도 일어나지만 전기적 부성물로서의 작용이 더 커진 결과라고 하겠다. 즉 처음에 放出電子를 捕捉하여 初期電子를 減少시켜 電子사태 형성을 방해시킨다. 둘째 電子를 捕捉하여 負이온화시키고 음극근방의 正空間電荷層을 中和시킨다.

위의 작용에 의하여 파괴전압상승이 된다. 即 少量의 I<sub>2</sub>添加時의 破壞電壓上昇과 같은 것이다. 또 제 1 peak가 3~10torr 근방에 존재하므로 I<sub>2</sub> 2mg//작용에 상당하는 SF<sub>6</sub>의 용해량이 10torr정도의 微小한 平衡壓일 때 생긴다고 생각된다. 전기적부성물질에 의한 破壞電壓上昇이 I<sub>2</sub>添加時에는 2mg//이고 SF<sub>6</sub>封入時는

10torr 정도에서 최대가 되므로 微量의 添加로 그 전기적부성효과는 최대가 된다고 생각된다.

제 1 peak이후의 파괴전압강하는 그림 4에서와 같이 Ar封入의 증가에 대하여 파괴전압이 감소하는 壓力效果와 그림 8에서와 같이 最適電氣的負性物 以上の 量을 가했을 경우의 電界의 歪形에 의한 破壞電壓의 減少效果를 합한 것이라고 생각된다. 이것은 壓力效果에 의한 최소파괴전압時의 Ar封入壓과 제 1 peak이후의 극소파괴전압時의 SF<sub>6</sub>平衡壓이 거의 같은 값이라는 것으로도 알 수가 있다.

이 극소치 이후의 SF<sub>6</sub>平衡壓에서는 또다시 파괴전압이 상승하여 제 2 peak로 된다. 이것은 Ar封入時의 최소파괴전압 이후에 볼 수 있는 壓力效果에 의한 파괴전압상승이 주로 작용하고 있다고 생각된다. 그러나 당연히 이 時點에 있어서도 전기적부성물로서의 영향에 의한 파괴전압강하도 나타날 것 같지만 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 제 2 peak에서는 Ar封入時의 파괴전압보다도 증가되고 있다. 이것은 용해되어 있는 SF<sub>6</sub>의 再氣相化에 의한 영향이라고 생각된다. 즉 Ar封入時의 氣相成分은 수소나 다른 低分子였는데 SF<sub>6</sub>의 경우는 그들 성분 외에 SF<sub>6</sub>의 再氣相化에 의하여 SF<sub>6</sub>가스가 混入되어 있다고 생각된다. 그것은 SF<sub>6</sub>가스가 다른 기체에 비하여 絶緣耐力이 크므로 발생한 氣泡內部的 파괴가 일어나기 어렵기 때문이고 기름의 全路破壞가 氣泡의 파괴에 의하여 일어난다고 생각된다. 그것은 Ar封入時에 비하여 파괴전압이 상승하는 것에 관련이 있을 것이라고 생각된다.

제 2 peak는 각 波形 모두 50torr 부근에 있고 그 50torr를 넘는 平衡壓이 되면 SF<sub>6</sub>의 再氣相化에 의한 氣泡發生은 다시 증가되며 壓力效果에 의한 파괴전압상승보다도 기포발생에 의한 파괴전압강하의 영향이 커져서 파괴전압은 내려간다고 생각된다.

#### 4. 結 論

- 1) 충분히 脫氣시킨 絶緣油는 SF<sub>6</sub>나 I<sub>2</sub>를 添加하거나 油面에 壓力를 加하므로써 그 絶緣耐力을 向上시킬 수 있다.
- 2) Ar을 封入하므로써 油面에 加해지는 壓力를 증가시켰을 경우의 파괴전압특성은 처음에 감소하고 최소점에 이르렀다가 다시 증가하는 특성을 갖고 그 최종적인 파괴전압의 증가는 波頭長이 길수록 크다.
- 3) I<sub>2</sub> 添加경우는 파괴전압이 최초로 증가하였다가 최대치에 達한 후 減少하는 특성을 갖는다. 또 各波形間의 破壞電壓 增加差는 거의 볼 수 없다.



4) I<sub>2</sub> 添加경우는 그 전기적부특성에 의한 電子의 捕捉으로 氣相形成을 阻害하기 때문에 破壞電壓을 增加시킨다고 생각되며 그 効果는 少量添加時에 나타난다. 大量添加時는 破壞電壓을 減少시킨다.

5) Ar封入效果는 氣泡內에서의 파괴를 어렵게 하기 때문에 파괴전압을 증가시킨다고 생각되며 그 効果는 크다.

6) SF<sub>6</sub>의 파괴전압특성은 Double peak특성이 되고 이것은 전기적부특성과 압력효과로 나누어 생각할 수가 있었다. 低平衡壓에서의 파괴전압의 증가는 전기적부특성이 支配的이고, 高平衡壓에서는 壓力效果가 支配的이라고 생각된다. 또 최종적인 파괴전압의 증가는 波頭長이 긴 波形일수록 현저하였다.

參 考 文 獻

[1] A. Nikuradse; Das Flussige Dielektrikum(1934) Berlin Springer  
 [2] F.M. Clark; J. Frank Inst. 215, 39 (1933)  
 [3] Megahed & H. Tropper; "Conduction Current Pulse in Transformer Oil," J. Phys. D. (Appl

Phys.) 4, 446 (1971)  
 [4] A.M. Sletten and T.J. Lewis; Brit. J. Appl. Phys. 14, 833 (1963)  
 [5] E.J. Murphy; "The Generation of Gases in the Dielectric Breakdown of Oil," J. Phys. D. (Appl. Phys.) 3, 917, (1970)  
 [6] 日本電氣學會: 放電ハンドブック  
 [7] C.G. Garton and Z. Krasuki; Proc. Roy. Soc. A. Vol. 280 (1964)  
 [8] A. Nosseir & Megahed; "Pre-breakdown Conduction Current Pulse in Insulating Oil under Non-uniform Conductions," J. Phys. D. (Appl Phys) 3 1205 (1970)  
 [9] N. Nosseir and R. Hawley; "Effect of Dissolved SF<sub>6</sub> on High Field Conduction in Mineral Oils," Brit. J. Appl. Phys. Vol. 16 (1965)  
 [10] A. Nosseir; "Effect of Dissolved Gasses, Stresses and Gap Spacing on High-field Conductivity in Liquid Insulated," IEEE Trans. Elect. Insulation EI-10 58 (1975)