

# 絶緣油의 交流部分放電에 미치는 添加物의 影響에 關한 研究

論 文  
29-8-4

## A Study on Effect of Additives upon A.C. Partial Discharge in Insulating Oil

鞠 相 勳\*  
(Sang-Hoon Kook)

### Abstract

Effects of Argon and Sulfur hexafluoride in the transformer oil are experimented under non-uniform A.C. electric field.

The result has shown that the corona frequency and corona charge quantity in liquid dielectrics were varied with gas condition in the oil and affected by the additives.

SF<sub>6</sub> that has the effects of pressure and electrical negative characteristic is the most effective.

The corona is considered to be the breakdown of bubble produced by gas contained in the oil or by dissociated ion of the oil molecules.

### 1. 序 論

絶緣油 中の 部分放電에 關한 研究는 이미 몇가지 報告<sup>1)~9)</sup> 되어 있지만 部分放電의 機構에 있어서는 아직도 不明한 點이 많다. 또 絶緣油 中の 部分放電에 미치는 添加物의 影響에 대해서는 絶緣油의 絶緣特性을 향상시키는 目的으로 絶緣油중에 意圖的으로 電氣的 負性氣體 SF<sub>6</sub> Gas를 溶解封入시킨 경우의 絶緣特性에 關한 研究가 Nosseir 등<sup>2)</sup>과 Megahed 外<sup>3)</sup> 몇가지 報告가 있을 정도이고 SF<sub>6</sub> Gas의 溶解封入量 또는 油面壓力을 변화시킨 報告는 아직도 볼 수가 없다.

高電壓機器의 絶緣破壞는 正常 運轉狀態에서는 部分放電의 세기와 밀접한 關係가 있으며<sup>10)</sup> 部分放電의 세기와 劣化關係 등은 今후 研究課題가 되어야 할 것이다.

液體는 分子構造가 氣體와 固體의 中間에 있기 때문에 다른 두 狀態에 比하여 液體破壞機構의 理論的 解明은 容易하지 않고 實驗的으로도 氣體의 溶解 不純物의 混入등에 의하여 再現性 있는 結果를 얻기가 힘든

다. 따라서 絶緣油의 高電界 電氣傳導와 絶緣破壞現象 및 部分放電의 機構研究등은 統一된 理論體系가 확립 되어 있지 않은 現狀이다.

本 論文은 絶緣油의 絶緣破壞機構를 研究하기 위하여 交流不平等電界(針 對 平板) 中の 絶緣油에 대하여 주로 Corona 頻度, Corona 電荷量에 미치는 添加物의 影響의 研究結果를 報告한다.

添加物로서는 壓力效果만이 期待되는 不活性氣體 Ar 및 電子親和力이 있고 그 特性으로 보아 氣體絶緣物로서 關心을 갖게 되는<sup>11)~13)</sup> SF<sub>6</sub>를 각각 封入 溶解시켜 比較檢討하였다.

### 2. 實驗裝置 및 實驗方法

#### 2.1 部分放電 檢出의 原理

本實驗에 사용한 部分放電 檢出의 測定回路는 그림 1과 같고 基本的으로는 그림 2(a) (b)와 같다. RC回路를 사용하여 部分放電의 檢出을 하였다. 그림 2 (a)에서 abc는 試料를 等價的으로 생각한 容量이고 C<sub>0</sub>는 檢出器의 漂遊容量이다.

試料에서 部分放電이 일어나면 C가 短絡된 것이라 고 생각된다. 이때 試料 a에서는

\* 正會員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 教授  
接受日字 : 1980年 6月 20日

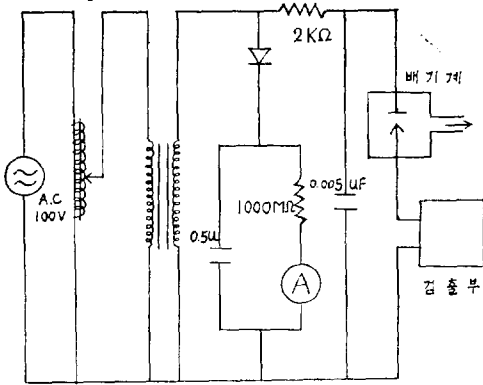


그림 1. 部分放電檢出의 測定回路  
Fig. 1. Measuring circuit for partial discharge detection

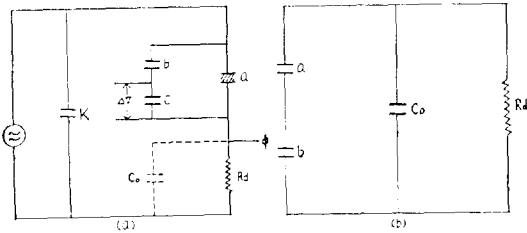


그림 2. 部分放電檢出의 等價回路  
Fig. 2. Equivalent circuit for partial discharge detection

$$q = b \cdot \Delta V \quad (1)$$

인 電荷量이 상실된 것이라고 생각된다. a의 兩端에는  
 $V = q/a$  (2)

인 電壓降下가 생긴다.

電壓펄스의 波高値를 생각하면 (2)식에서 표시되는 電壓이 a, K, C<sub>0</sub>에서 分배된다.

直列接續의 C<sub>0</sub>, K,의 合成容量 C<sub>1</sub>은

$$C_1 = \frac{C_0 K}{C_0 + K} \quad (3)$$

이 되고 따라서 C<sub>1</sub>에 걸리는 電壓은

$$V_{K C_0} = \frac{a}{a + C_1} V \quad (4)$$

가 된다. 또한 C<sub>0</sub>에 걸리는 電壓은

$$V_{C_0} = \frac{K}{K + C_0} V_{K C_0} = \frac{K}{K + C_0} \cdot \frac{a}{a + C_1} V \quad (5)$$

가 된다. (5)식에 (2)(3)식을 代入시키면

$$V_{C_0} = \frac{q}{(1 + C_0/K)a + C_0} \quad (6)$$

이 되어 放電펄스의 波高値가 결정된다.

다음 時定數를 생각해 본다.

그림 2(a)를 그림 2(b)로 바꾸어서 생각하면 合成容量 C<sub>2</sub>는

$$C_2 = \frac{aK}{a + K} + C_0 \quad (7)$$

時定數 τ는

$$\tau = R d \left( \frac{aK}{a + K} + C_0 \right) \quad (8)$$

이 되어 放電펄스는 單方向性인 波形이 된다.

그러므로 Rd 양단의 電壓펄스는

$$V_{C_0} = \frac{q}{(1 + C_0/K)a + C_0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (9)$$

로 주어지는 指數函數 波形이 된다.

따라서 電壓펄스 V<sub>C<sub>0</sub></sub>의 波高値를 알 수 있으므로 電花量을 구할 수 있다. 그리고 코로나雜音測定器(CNT/5型日製)를 사용하여 그림 1의 檢出部에서 얻어진 電壓펄스를 正極性펄스와 負極性펄스로 구별하여 각종 波高値마다 카운터로 펄스數를 計數하였다. 또 波高値와 電荷量과의 關係는 較正펄스를 사용하여 미리 電荷量으로 換算하여 波高値 1V의 電壓펄스는 7.6PC 電荷量에 相當하는 結果를 얻었다.

또한 電荷펄스의 波高値는 (9)식에서 檢出抵抗 Rd와 關係가 없지만 Rd가 적으면 時定數 Rd·m가 적어져 電壓펄스가 갑자기 커지므로 增幅器로 충분히 增幅되지 않으므로 本實驗에서는 2KΩ로 하였다.

### 2.2 實驗裝置

脫氣 및 Ar 가스 封入, SF<sub>6</sub> 封入 溶解를 하기 위한 眞空유리系를 그림 3에 표시하였다.

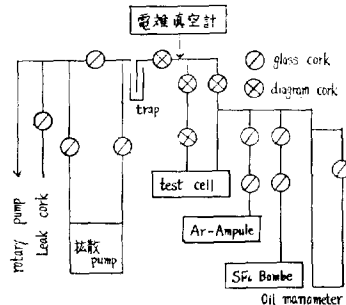


그림 3. 眞空 유리系 불력·다이그림  
Fig. 3. Block diagram for vacuum-glass system

印加電壓 측정에는 交流를 실리콘 整流器로 整流하여 直流 마이크로 암메터로 封入壓 측정에는 0.06Torr/mm의 오일마노메터(Oil Manometer)를 사용하였다.

電極은 針 對 平板이고 針은 針端直徑 15미크론의 몰리브덴(molybdenum)製 平板은 直徑 3cm 두께 7mm의 Rogowski型 니켈製, 갭 寬이를 1mm에 고정시키고 試驗容器 內部の 現象觀察을 편이하게 하기 위하여

平板을 정원의 고압측으로 하여 수평방향에 전극을 부착시켰다.

2.3 實驗方法

脫氣油 측정의 경우는 脫氣직전에 유리 필터(Glass Filter)로 5회 진공여과 하여 10시간 확산펌프와 로타리 펌프(Rotary Pump)로 脫氣시키고 동시에 洗滌器로 전극의 표면을 처리하여 가스를 제거 시켰다.

Ar 封入의 경우는 脫氣油의 경우와 같은 처리를 하고 所定量의 Ar을 封入한 후 즉시 실험을 하고 파괴 후 즉시 脫氣하여 所定量의 Ar을 封入하여 실험하였다. 이 조작을 Ar의 封入壓이 낮은 것부터 5종류 실험

시한 후 變壓器油를 바꾸어 같은 조작을 반복하였다.

SF<sub>6</sub> 용해 封入은 脫氣油의 경우와 똑같은 조작으로 SF<sub>6</sub>을 所定量 封入하고 30시간 방치 후 油面에 加해지는 압력을 平衡으로 하여 실험하였다. 이 경우는 1회 파괴 할때마다 變압기유를 교환하였다. 이 실험을 통해서 試驗容器중의 기름容量을 500cc로 통일하고 가스 봉입 전의 진공도는 10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>Torr였다.

印加電壓의 상승은 1KV 식하고 코로나頻度の 측정 은 카운터에 同期게이트(Gate)部를 접속시켜 10周期分의 코로나頻度を 計數하였고 곁하여 파괴전압도 측정 하였다.

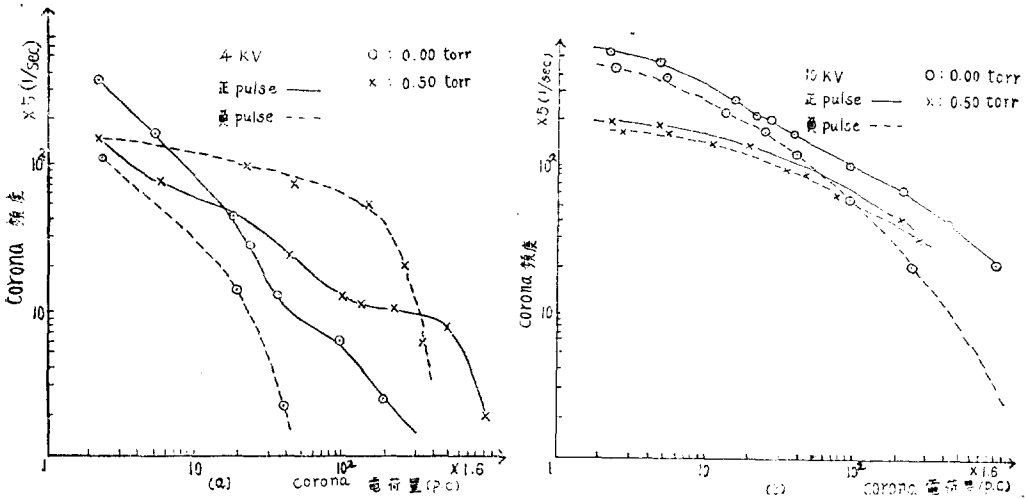


그림 4. Corona 電荷量에 對한 corona 頻度  
Fig. 4. Relation between corona frequency and corona charge quantity

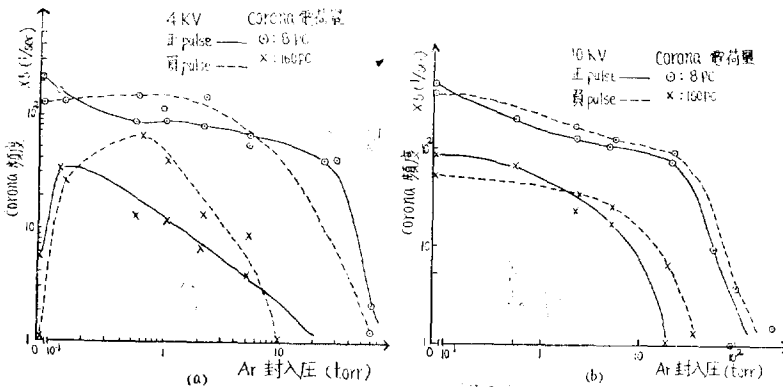


그림 5. Ar 封入壓에 對한 corona 頻度  
Fig. 5. Corona frequency according to Ar. compression

3. 實驗結果 및 檢討

3.1 Ar 封入의 경우

Ar 封入壓을 파라미터로 하여 코로나 電荷量에 대한 코로나頻度を 印加電壓 4,10KV 별로 正負펄스의 결과를 표시한 것이 그림 4(a)(b)이다. 이 결과 部分放電의 크기를 나타내는 코로나電荷量이 증가함에 따라 발생하는 코로나數는 감소 되어갔다. 그리하여 印加電壓의 상승에 따라 코로나頻度も 증가하지만 正負펄스간에 相異點은 보이지 않았다. 이것은 Ar이 不活性氣體이기 때문에 다만 壓力效果만을 주고 極性效果는 나타나지 않는 점에서 당연한 결과라고 생각된다.

그림 5 (a)(b)는 코로나電荷量을 파라미터로 하였을 때의 Ar 封入에 대한 코로나頻度を 표시하고 있으며 印加電壓 4,10KV로 正負의 펄스에 대하여 표시한 것이다. 이것에 의하면 Ar 封入壓의 증가에 따라 電荷量이 많은 펄스나 적은 펄스가 꼭같이 코로나頻도가 감소하며 이 경향은 正負펄스 모두 같다. 단 印加電壓이 比較的 적은 4KV에서는 電荷量이 많은 코로나에 대하여 그 發生頻도가 正펄스는 0.1Torr 부근, 負펄스는 0.5Torr 부근에서 Peak로 되었다. 결국 印加電壓이 낮을 때는 발생하지 않았던 電荷量이 많은 펄스가 Ar의 미소封入壓에 의해서 발생하기 시작하며 다시 Ar의 封入壓을 증가시키면 발생하지 않았다.

그림 6은 印加電壓을 파라미터로 하여 Ar 封入壓에 대한 코로나頻度を 나타내고 있다. 그림 7에 印加電壓을 파라미터로 하여 Ar 封入壓에 대한 최대 코로나電荷量의 결과를 표시하였다. 여기서도 Ar 封入壓의 증가에 따라 최대코로나電荷量도 증가하며 0.1~0.5Torr

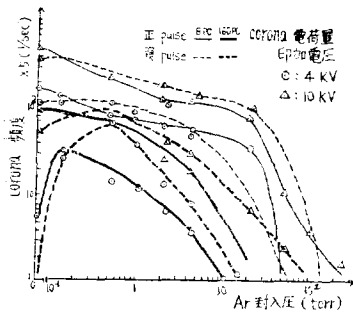


그림 6. Ar 封入壓에 對한 corona 頻度  
Fig. 6. Corona frequency according to Ar. compression

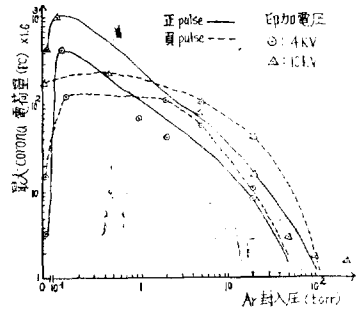


그림 7. Ar 封入壓에 對한 最大 corona 電荷量  
Fig. 7. Maximum corona charge quantity according to Ar.

사이에서 極大值를 가지며 그 이후는 감소하여가는 경향을 보였다. 그리고 印加電壓이 상승하더라도 極大值를 갖는 성질은 변하지 않았다. 최대 코로나가 파괴적인 상태를 비교적 잘 나타내고 있다고 가정한다면 氣體放電에서의 파센(Paschen)法則을 液體속의 氣泡內에서 적용될 수 있다고 생각된다. 이 사실로부터 알 수 있는 것은 電荷量이 적은 코로나와 電荷量이 많은 코로나 사이에는 코로나 자체에 어떤 相異한 것이 있다는 점이다. 즉 電荷量이 적은 코로나는 電子사태 혹은 매우 微細한 氣泡의 破壞이고 兩者는 相互영향을 미치면서 電子사태가 증가하면 氣泡가 발생하기 쉽고 그 결과 氣泡內에서의 電子사태도 발생하기 쉽고 相乘的으로 증가하고 있다. 그리하여 160P.C의 코로나는 그것보다는 성장한 큰氣泡內에서의 파괴가 아닌가 생각된다. 이런 생각에 기인하여 電荷量이 적은 코로나 즉 微細한 氣泡는 Ar 封入壓에 의하여 印加電壓의 태소에 관계없이 발생이 억제 되어진다. 그리하여 電荷量이 많은 코로나 즉 약간 크게 성장한 氣泡에 대하여는 壓力效果가 氣中에서의 파센曲線 極值 부근에서 效果를 주는 것이라고 생각된다.

3.2 SF<sub>6</sub> 量 溶解封入한 경우

그림 8은 印加電壓 10KV의 경우 正負펄스에 대하여 코로나 電荷量을 파라미터로 하였을 때의 SF<sub>6</sub> 平衡壓에 대한 코로나頻度を 표시한 것이다. 실험에서는 15Torr 부근에서 코로나는 측정되지 않았고 破壞가 일어났다. 이것으로 보아 平衡壓이 증가됨에 따라 코로나頻度は 감소되는 경향을 나타낸다. 이것은 SF<sub>6</sub>의 電子捕捉作用에 의한 負이온이 解離 電離하여 이루어진 正이온에 의한 空間電荷의 作用을 弱化시키는 것과 SF<sub>6</sub> 가스의 壓力效果에 의한 것이라 생각된다.

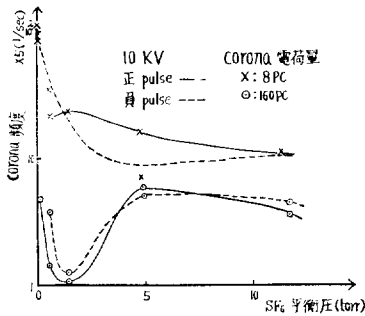


그림 8. SF<sub>6</sub> 平衡壓에 對한 corona 頻度  
 Fig. 8. Relation between corona frequency and equalized pressure of SF<sub>6</sub>

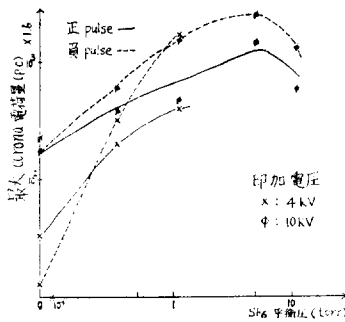


그림 9. SF<sub>6</sub> 平衡壓에 對한 最大 corona 電荷量  
 Fig. 9. Maximum corona charge quantity according to equalized pressure of SF<sub>6</sub>

그림 9은 正負펄스에 대하여 印加電壓을 파라미터로 하였을 경우의 SF<sub>6</sub> 平衡壓에 대한 최대 코로나 電荷量을 나타내고 있다.

SF<sub>6</sub> 平衡壓이 낮은 경우는 電荷量이 적은 코로나나 電荷量이 많은 코로나나 함께 존재하지만 SF<sub>6</sub> 平衡壓이 증가되면 電荷量이 많은 코로나 만이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이것은 平衡壓이 높아지면 적은 氣泡은 없어지지만 큰 氣泡에는 SF<sub>6</sub> 가스가 溶入되어 氣泡의 內部壓力이 증가된다. 이 때문에 耐壓이 증가된 큰 氣泡만 존재한다고 생각된다.

4. 結 論

1) Ar을 封入한 경우

코로나頻度는 0.1~0.2Torr의 微小壓力에서 약간 증가되며 封入壓을 증가시키면 격감하여 200torr 이상이

되면 1초당 수개로 되며 최대 코로나의 電荷量에 대하여도 코로나頻度和 똑같은 결과가 얻어졌다.

2) SF<sub>6</sub>를 溶解封入한 경우

코로나頻度는 0~0.5Torr부근까지는 SF<sub>6</sub>가 갖는 전기적 부성효과로 감소하지만 平衡壓을 증가시키면 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>에 의하여 內部電界가 歪曲되어 코로나가 발생되기 쉽다. 平衡壓을 더욱 증가시키면 壓力効果에 의하여 코로나頻度는 감소되며 15Torr 이상이 되면 코로나는 전혀 발생하지 않는다. 이에 대하여 최대 코로나 電荷量은 SF<sub>6</sub>의 平衡壓의 증가와 더불어 증가한다.

3) 코로나 발생을 억제하려면 壓力効果와 電氣의 負性效果가 期待되는 SF<sub>6</sub>가 가장 효과적이라 생각된다.

4) 코로나頻度 및 최대 코로나의 電荷量은 液面에 가해지는 壓力에 의존된다는 것으로 보아 코로나는 油中에 吸藏되어 있는 가스 또는 電子에 의한 기름分子의 解離에 의하여 생긴이온(例 H<sup>+</sup>)등에 의해서 생긴 대단히 작은 氣泡의 破壞일 것이라고 짐작된다.

參 考 文 獻

1. A. Nosseir; "Pre-breakdown Conduction Current Pulses in Liquid Dielectrics" Nature 198, 1295 (1963)
2. A. Nosseir & R. Howley; "Effect of Dissolved SF<sub>6</sub> on High Field Conductivity in Mineral Oils" Brit. J. Appl. Phys., 16, 1633 (1965)
3. I. Megahed & H. Tropper; "Effect of Electronegative Gases on Prebreakdown Conductioncurrent Pulses in Transformer Oil" Proc. Instn Elect. Engrs 114 538 (1967)
4. I. Megahed & A. Nosseir; "Measurement of Outocorrelation Function and Power Spectral Density of Pre-breakdown Conduction Current Pulses in Liquid Dielectrics" J. Phys. E. (Sci. Instrum) 2, 880, (1969)
5. J.K. Nelson & P.B. McGrath; "The Effect of Stressinduced Motion on the Conduction Current Statistics of Liquid Dielectrics" J. Phys. D. (Appl. Phys.) 5, 1111 (1972)
6. A. Nosseir; "Effect of Dissolved Gases, Stresses, and Gap Spacing on High-field Conductivity in Liquid Insulants" IEEE Trans. Elect. Insulation EI-10 58 (1975)
7. I. Megahed & H Tropper; "Conduction Current Pulses in Transformer Oil", J. Phys D.

- (Appl. Phys.) 4 446 (1971)
8. I. Megahed & A. Nosseir; "High-field Conductivity in Liquid Paraffin", J. Phys. D. (Appl. Phys.) 8 2092 (1975)
9. A. Nosseir & Megahed; "Pre-breakdown Conductioncurrent Pulses in Insulating Oils under Non-uniform Conductions" J. Phys. D. (Appl. Phys.) 3 1205 (1970)
10. 日本電気學會；放電ハントゴラク
11. 山中千代衛；近代高電壓・放電工學
12. Dr. F.H. Kreuger; Discharge Detection in High Voltage Equipment
13. Lewis; Progress in Dielectrics Conduction and Breakdown in Liquid Dielectrics