

## 유입변압기용 절연유의 절연파괴특성

### Electrical Breakdown Properties of Insulating Oils for oil-immersed transformer

이인성\*, 신현택\*, 이종필\*, 이수원\*\*, 홍진웅\*  
(I. S. Lee\*, H. T. Shin\*, J. P. Lee\*, S. W. Lee\*\*, J. W. Hong\*)

#### Abstract

With the intention of investigating the breakdown properties of oil-immersed transformer oils in temperature range of 20~100[°C], we are made researches AC breakdown in the gap of 500~2,500[μm]. The classification for the physical properties of oil for oil-immersed transformer by FTIR and <sup>1</sup>H-NMR experiments was confirmed to type of mineral oils.

As the dependance of breakdown properties due to electrode gap length variation, breakdown voltage was found increasing according to the increase of gap, while dielectric strength was decreasing. As a result the characteristics for AC breakdown, It goes to prove that the breakdown voltage was increased to 90[°C] but decreased over 90[°C] in the temperature range. Also, breakdown voltage was found increasing in the increase of gap and the rising of temperature according to Weibull distribution.

**Key Words** : breakdown properties, oil-immersed transformer oil, AC breakdown, dielectric strength, mineral oil

#### 1. 서론

최근 산업의 발달과 경제 성장으로 가정, 사무실 그리고 산업현장에서 사용되고 있는 전기제품 및 전력설비는 매년 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 전력설비는 대용량화, 초고압화가 매우 빠르게 진행되어 전력계통의 변성기기는 거대화로 되므로 절연 및 냉각용 액체 절연 시스템은 고신뢰성이 요구되고 있다. 일반적으로 액체 절연체는 유입 전력변성기에 주로 사용되며 절연유는 원유를 정제하여 얻은 탄화수소를 주성분으로 한 광유로

1887년 미국에서 특허를 얻어 초기에는 파라핀계 광유가 주종이었으나, 1925년경부터 나프텐계로 대체되고 있다. 전력변성기에서 전기절연 및 냉각용으로 주종을 이루는 광유 1종2호를 시료로 사용하였는데, 실제 현장에서 변압기 또는 각종 개폐기에 이용되고 있으므로 약간의 불순물이나 수분은 포함될 수 있다. 따라서 본실험에서는 현장에서 적용시 탈가스나 불순물을 제거하지 않으므로 같은 조건에서 전기적 특성 실험중 절연파괴특성을 실험하고 파괴 확률분포를 이용하여 온도와 갭길이 변화에 따른 절연성의 평가를 조사하였다. 그리고 시료의 실험조건은 실온에서 100[°C], 전극간격은 500 [μm] ~ 2500 [μm] 범위에서 교류(AC) 전압의 절연파괴강도와 자계를 인가할 경우 절연파괴특성에 미치는 영향을 조사한 결과를 보고한다.

\* : 광운대학교 전기공학과  
(서울시 노원구 월계동 447-1,  
Fax : 02-915-4630  
E-mail : insung815@kebi.com)  
\*\* : 한국철도대학 전기제어과

## 2. 실험

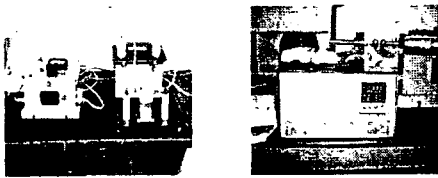
### 2.1 실험장치

유입변압기용 절연유의 전기적 특성을 조사하기 위하여 절연파괴특성은 gap변화에 따른 절연파괴 강도와 온도변화에 따른 절연파괴 강도 및 자체의존성을 실험하였다.

#### ● 절연파괴실험

절연유 절연파괴 실험법에는 여러방법이 있는데, 교류 절연파괴 실험은 KS, IEC, JIS, ASTM 등에 명기되어 있는 규격에 따라 시험하였다.

AC 절연파괴 실험은 전극의 간격을 마이크로메터를 이용하여 조절하고, 직경은 12.5[mm]의 구전극을 사용했으며, 전압 상승율은 매초 약 3,000[V] 비율로 전압을 높이면서 절연파괴 될 때까지 전압을 인가하고서 절연파괴 강도는 기록계를 이용하였다. AC 절연파괴 측정장치의 구성은 변압기, 회로 차단기, 저항기, 전압조절장치 및 전극으로 되어 있으며, 측정온도의 조절은 히터와 자동온도 조절장치를 이용하여 연구실에서 자체 제작하였다. AC 절연파괴 특성은 MUSASI Co. Ltd. Model IP-5005s type을 사용했으며, 양극간 출력전압은 50[kV]까지 사용이 가능하다. 특히, 측정용 전극의 온도 조절장치는 연구실에서 자체 제작하였다.



(a) 절연파괴장치 (b) 온도 조절장치

사진 1. 실험장치

#### ● 교류 절연파괴 측정방법

절연파괴 전압은 정현파 교류로 측정오차는 수 [%]를 넘지 않게 한다.

- ① 전극 용기를 청소한다.
- ② 전극 위로 20[mm]까지 (표시선 까지) 시료를 넣고, 기포가 없게 수분간 방치하면서 측정온도를 셀팅 한다.
- ③ 전압상승은 3[kV/sec] 비율로 전극에 인가한다.
- ④ 파괴전압의 측정은 같은 시료에 대하여 5회 측정한다. 이때 절연파괴 후 약 1분이상 방치하여 기름속에 생긴 기포가 보이지 않을 때 다시 실험한다.
- ⑤ 새로운 시료를 전극 용기에 넣고 ①~④를

반복한다.

- ⑥ 절연파괴 전압은 동일 시료 2개를 5회씩 반복하고 각각의 초기 실험값( $V_1, V_6$ )을 제거한 8개 측정값의 평균 절연파괴 전압  $V$ 로 한다.

$$V_B = \frac{(V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_7 + V_8 + V_9 + V_{10})}{8}$$

평균 절연파괴 전압으로부터 절연파괴 강도  $F_b$ 를 아래식을 이용하여 계산하고, 통계 프로그램을 이용한 표준편차를 구한다.

$$F_b = \frac{V_B \text{ [kV]}}{d \text{ [cm]}}$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 절연파괴 강도의 갭길이 의존성

일반적으로 갭길이가 커지면 절연파괴 강도는 변화하는데 갭길이가 커지면 절연파괴 강도는 저하한다. 그림 1은 변압기유의 갭 길이에 대한 절연파괴 강도를 나타낸 그림으로 갭길이가 커지면 낮아짐을 확인할 수 있다. Goodwin, Edwards, Sharbaugh, Crowe, Liewis 씨 등은 1000 [ $\mu\text{m}$ ] 이하 작은 갭길이에서 펄스전압 인가시 갭길이  $d$ 가 작으면 급격히 감소한다고 보고하고 있다. 본실험에서도 25[ $^{\circ}\text{C}$ ]에서는 750[ $\mu\text{m}$ ]까지 거의 변화가없고 750[ $\mu\text{m}$ ]이후 급하게 감소하다가 1250 [ $\mu\text{m}$ ] 이상에서는 지수함수적으로 서서히 감소한다. 그리고 50[ $^{\circ}\text{C}$ ]~100[ $^{\circ}\text{C}$ ]에서는 갭길이가 작은 1000[ $\mu\text{m}$ ]이하의 경우 지수함수적으로 급하게 감소하고 있다. 이것은 갭길이가 길어지면 불순물의 존재확률이 높아지기 때문으로 사료된다.

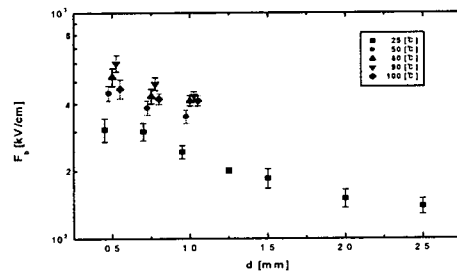


그림 1. 갭변화에 따른 파괴전압(무자계)

그림 2는 측정온도 25[ $^{\circ}\text{C}$ ] 때와 80[ $^{\circ}\text{C}$ ], 90[ $^{\circ}\text{C}$ ] 때 자체 14[mT] 인가 유·무에 따른 절연파괴특성을 조사한 그림이다. 같은 조건에서 자계가 인가되면

무자계의 절연 파괴전압보다 낮아진다. 이것은 자계에 의한 전자가 이동시 힘을 얻기 때문에 절연 파괴전압이 낮아지며, 갭간격이 좁고 측정온도가 25[°C] 때는 자계인가시가 무자계시보다 매우 낮으나, 측정온도가 90[°C] 로 높아지면 액체의 점성이 낮아지고 열에너지에 의한 캐리어의 이동이 자계가 미치는 힘보다 상대적으로 낮아져 자계의 영향이 적은 것으로 사료된다

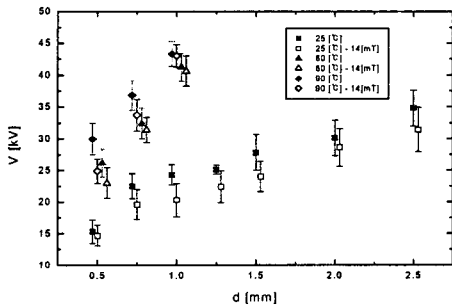


그림 2. 갭 변화에 따른 파괴전계

### 3-2 온도 의존성

상용 주파수의 교류전압을 전극에 인가하면 불순물에 의한 영향으로 파괴전압이 변동하기 쉽다. 그림 3은 탈기하지 않고 현재 변압기유 절연파괴전압의 온도의존 특성을 나타낸 그림으로 측정온도가 상온에서 60[°C]로 상승시 절연파괴전압의 증가율이 0.5[mm]에서는 45.75[%], 0.75[mm]에서는 28[%], 1[mm]에서는 44[%]로 증가하고 있다. 그리고 60[°C]이후 측정온도가 상승할수록 파괴전압증가율은 서서히 감소하다가 90[°C]에서 최대파괴전압이 나타난 후 그 이상온도에서 100[°C]까지는 파괴전압이 90[°C]보다 0.5[mm]에서 28.7[%], 0.75[mm]에서 16.8[%], 1[mm]에서 5.1[%]로 감소함을 확인할 수 있다. 그리고 野의 연구 보고에 의하면 절연유 및 전극을 충분히 탈기할 경우 온도의 영향은 거의 없다. 그러나 기름만 탈기하고 전극을 탈기하지 않은 경우 파괴전압은 山와 같은 특성을 얻었다. 따라서 본 논문에서도 시료 및 전극이 탈가스하지 않고 현장과 같은 조건에서 실험했으므로 90 [°C]에서 최대파괴전압이 나타나며 이현상은 시료내 녹아 있는 가스의 영향임을 알 수 있다. 그리고 90 [°C]에서 절연파괴전압이 최대로 되는 현상은 절연유내 용해된 공기가 쉽게 제거되기 때문으로 사료된다.

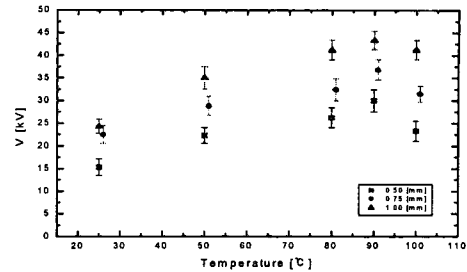


그림 3. 온도에 따른 파괴전압

그리고 Clark는 온도를 여러종류로 변화시켜 공기의 용해도와 절연파괴 전압을 측정하였는데 절연파괴 전압의 최대값은 100[°C]에서 나타남을 보고하고 있는데 본 실험의 경우 절연유내 용해된 공기가 온도가 높아짐에 따라 외부로 방출되기 쉬워짐에 따라 약간의 탈기현상과 유동현상으로 인한 불순물의 영향을 적게하므로 인하여 절연파괴 전압은 증가된다.

### 3-3 절연파괴전압의 Weibull function

와이블분포는 최강점 파괴확률분포라고도 부르며 누적확률분포는 확률변수 X의 실현치를 x로 하여

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-x_1}{x_s}\right)^m\right] \quad (x \geq x_1)$$

$$= 0 \quad (x < x_1)$$

으로 표시된다. 확률변수 X의 실현치가 x이하가 되는 확률이 F(x)라는 것을 의미하고 있는데 여기서  $x_1$ ,  $x_s$ , m은 각기 위치파라미터, 척도파라미터, 형상파라미터라고 부른다. 형상모수 m은 누적파괴 확률분포의 분포형상을 결정하는 파라미터로서 m이 커짐에 따라 호트러짐은 작은 분포로 되며 m이 1정도에서는 지수분포에 가까운 분포형상이 되고 m이 4정도 이상이 되면 정규분포에 가까운 형상이 된다.  $x_1$ 은 이 값 이하에서는 절대로 절연파괴 등의 현상이 일어나지 않는다는 하한값이며, 또  $x_s$ 는 누적파괴율 63.2[%]에 상당하는 평균적인 파괴강도에 대응하는 파라미터이다.

실험시 나타나는 전기적 트리를 진전시키면서 절연파괴전압을 평가하고 얻어진 결과를 통계적으로 검토하기 위해서 2-파라미터 와이블 함수를 이용하였다.

먼저 온도 및 갭길이에 따른 누적파괴 확률, 척도

파라미터, 형상파라미터 값을 구하면 다음과 같다.  
 (1) 1[mm] 갭길이에서의 온도의 변화에 따른 파괴전압의 척도 파라미터( $x_s$ )와 상온에서 갭길이 변화에 따른 파괴전압에 대한 척도파라미터

표 1. 파괴전압의 척도 파라미터( $x_s$ )

구분	1[mm] 갭 시료				
온도[°C]	25	50	80	90	100
척도 파라미터 ( $x_s$ )	24.78	36.355	42.294	44.124	42.198

표 2. 파괴전압의 척도 파라미터( $x_s$ )

구분	상온 시료						
거리[mm]	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
척도 파라미터 ( $x_s$ )	16.27	23.48	24.78	25.38	29.32	31.38	36.14

(2) 1[mm] 갭 길이에서의 온도의 변화에 따른 파괴전압의 형상 파라미터(m)와 상온에서 갭길이 변화에 따른 파괴전압에 대한 형상 파라미터

표 3. 파괴전압의 형상 파라미터(m)

구분	1[mm] 갭 시료				
온도[°C]	25	50	80	90	100
형상파라미터(m)	18.27	12.93	17.7	22.98	17.7

표 4. 파괴전압의 형상 파라미터(m)

시료	상온 시료						
거리 [mm]	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
형상파라미터 (m)	7.9	10.24	18.27	35.55	8.81	10.9	11.93

지금까지 구한 척도 파라미터와 형상 파라미터로부터 추정 절연파괴전압을 구하면 다음과 같다.

$M = x_s \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{m}}$ , 따라서 추정 파괴강도 M의 계산 결과값은 표 5 와 표 6과 같다.

표 5. 파괴전압의 추정 파괴전압(M)

구분	상온 시료						
거리 [mm]	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
절연파괴 전압[kV]	15.5	22.6	24.3	25.1	28.1	30.3	35

표 6. 파괴전압의 추정 파괴전압(M)

구분	1[mm] 갭 시료				
온도 [°C]	25	50	80	90	100
절연파괴 전압[kV]	24.3	35.3	41.4	43.4	41.3

#### 4. 결론

유입변압기용 절연유의 전기적 특성을 조사하기 위하여 절연파괴실험을 한 결과

1. 절연파괴전압은 갭길이가 길어질수록 불순물의 존재확률이 높아지기 때문에 증가율이 감소하고, 절연파괴 강도는 같은 온도조건과 갭조건에서 자계인가시 보다 무자계일 경우 절연파괴강도가 높게 나타남을 확인하였다.
2. 절연파괴 강도는 상온에서 온도가 상승함에 따라 증가하고 90[°C]이상의 온도영역에서는 감소됨을 확인하였다.
3. Weibull 함수에 의해 상온에서 갭길이가 증가함에 따라 절연파괴전압이 증가함을 확인하였다.
4. Weibull 함수에 의해 1[mm] 갭길이에서 온도가 상승함에 따라 절연파괴전압이 증가함을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] A. C. M. Willson ; "Insulating liquids; their uses, manufacture and properties", PETER PEREGRINUS LTD, pp 3-85 (1980)
- [2] 伊勢 順一; 油中ガス分析について, 石油學會誌, 17, 7, PP 564-571 (1974)
- [3] M. Pompili, C. Mazzetti and R. Bartnikas; Early Staages of Negative PD Development in Dielectric Liquids, IEEE. Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 2, 4, pp602-613 (1995)
- [4] T. Miyamoto and M. Tsuchie; Electrical Conduction in Insulating Oil, Japn. JIEE, 98, 1, pp 17-22 (1978)
- [5] F. M. Clark ; Insulating materials for Design and Engineering Practice ; New York, John & Wiley, PP 169-180 (1962)