

변압기유의 전기적 특성에 관한 연구(I)

A Study on the Electrical Properties of Transformer Oils(I)

이 용우* 광운대학교 대학원 전기공학과
 조 돈찬 광운대학교 대학원 전기공학과
 홍 능표 광운대학교 대학원 전기공학과
 신 만섭 서울산업대학교 대학원 전기공학과
 홍 진웅 광운대학교 대학원 전기공학과

LEE, YONG WOO* Dep. of Electrical Engin. , KwangWoon University
 CHO, DON CHAN Dep. of Electrical Engin. , KwangWoon University
 HONG, NUNG PYO Dep. of Electrical Engin. , KwangWoon University
 SHIN, MAN SEOB Dep. of Electrical Engin. , Nat'l Seoul Polytechnic University
 HONG, JIN WOONG Dep. of Electrical Engin. , KwangWoon University

1. 서 론

산업사회의 발달로 전력수요가 급증하고 송전전압이 초고압화로 전력 변성기기가 거대화 되고 있다. 이에 따른 전력기기의 냉각과 절연특성의 경제적 운용관리를 위해 사용하고 있는 액체 절연체에 대해서 많은 관심이 집중되고 있다.

일반적으로 액체 절연체중 전력기기에 가장 많이 사용하고 있는 것은 광유이다.

광유는 변압기에 87[%]로 주종을 이루며, 이외 Capacitor 와 Cable 기타 순으로 사용되고 있다.

액체 절연체의 절연내력은 액체의 종류, 온도, 압력, 불순물 등의 영향을 쉽게 받으므로 매우 복잡하다.

액체의 절연파괴 기구의 연구는 분자구조가 간단한 탄화수소계 및 저온 액체에 대해 시작하여, 특히 액체의 절연파괴는 전구현상인 전도기구에 깊은 관계가 있다.

또한, 최근 계측기술의 신속한 발달로 정확도가 높은 정보수집을 직접적으로 얻을수 있어 절연파괴의 연구가 급속하게 발달하고 있다. 본 실험에서는 전기절연용 광유에 대하여 기초 물성연구와 실온부터 100[°C]내에서 AC 및 Impulse 전압 인가시 절연파괴 기구에 대하여 보고한다.

2. 사용시료 및 실험방법

2-1. 사 용 시 료

광유는 나프텐계 원유로부터 제조된 변압기유로 일체 첨가제를 넣지 않았다.

시료는 순수 국산으로 동남석유공업(주) DNI-1 4호로 탄화수소로 조성된 것을 선택하였다. 절연유의 기초 물성은 표 1과 같다.

광유계 절연유 속에 포함된 탄화수소는 매우 복잡한 이성체로 구성되어 화학구조를 아는 것은 불가능하고 Type 분류로 표시된다.

Table 1. Physical Properties of Specimen

Transformer Oils	
Specific gravity	0.898
Viscosity [cSt]	40[°C] 10.5 100[°C] 2.5
Pour point	-35[°C]
Flash point	150[°C]
Corrosive sulfur	None
Dielectric strength (2.5[mm])	60 [kV]

2-2. 시 험 방 법

절연유 절연파괴 실험법에는 여러방법이 있는데, 교류 절연파괴 실험은 ASTM, IEC, JIS, KS 등에 명기되어 있고, Impulse 절연파괴 실험은 ASTM에만 규정되어 있다.

따라서, 본 실험에서도 AC와 Imp. 절연파괴 특성에 대하여만 조사 하였다.

AC 절연파괴 특성은 MUSASI Co. Ltd. Model IP-5005s type을 사용했으며, 양극간 출력전압은 60[kV]까지 사용이 가능하다.

전압상승은 자동 승압방법을 이용하여 3000[V/sec] 속도로 출력전압을 조절하였다.

그리고, Imp. 절연파괴 측정은 Pulse Electronic Engineering Co. Ltd. Model IVG-600을 사용했으며 인가

최대전압은 480[kV] 이다.

한편, 실험에 사용된 전극의 구성은 12.5[mm]의 구대구 전극을 사용했으며, 시료의 온도조절은 디지털 온도조절 계를 이용한 히터로 측정온도 20[°C] ~ 100[°C]를 유지할 수 있도록 자체 제작 하였고, 전극간 간격은 마이크로미터를 사용하여 조절하였다.

3. 실험결과 및 검토

3-1. 시료의 물성

절연유는 모두 고유한 전자파 Spectrum을 갖고 있으며, 그 Spectrum은 물질의 분자구조에 대응하고 있다. 이러한 특징을 이용해서 적외선 Spectrum 및 Nuclear Magnetic Resonance(NMR) Spectrum을 이용해서 절연유의 종류를 구분할 수 있다. NMR Spectrum에서는 원자핵의 자기쌍극자 모멘트로 외부자장을 작용시켜 이것을 여기하고, 공진진동수를 검출한다. NMR에는 분석대상으로 하는 원자핵에 의해 $^1\text{H-NMR}$ 과 $^{13}\text{C NMR}$ 이 있고, Tetramethyl-silan의 공진주파수를 기준으로 해서 화학시프트(ppm)를 정한다.

적외선 흡수 Spectra를 사용한 절연유의 식별은 파수 1600[cm^{-1}]에서 흡수가 없으면 3종이나 6종이다. 그러나 흡수가 있고 파수 1700[cm^{-1}] ~ 2000[cm^{-1}]에 4분의 흡수가 있으면 2종이나 5종이 되고 흡수가 없고 파수 1630[cm^{-1}]에서 흡수가 있으면 4종, 없으면 1종으로 구분된다.

본 실험에서 사용된 시료의 IR 특성도는 그림 1과 같으며

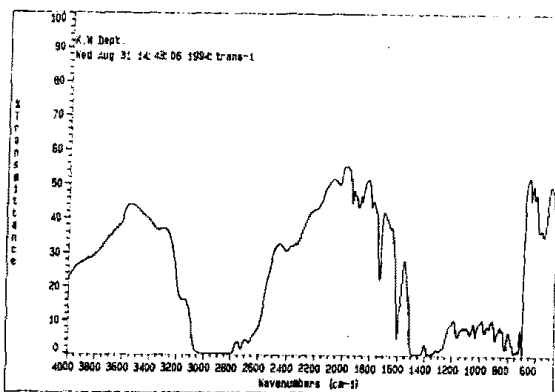


Fig. 1 Infra-red spectrum of specimen

위의 해석법을 이용하여 기름의 종별을 분류하면 1종 절연유로 된다.

한편, $^1\text{H-NMR}$ spectrum을 이용 0.5[ppm] ~ 2.5[ppm]에서 나프텐환, 2.5[ppm] ~ 4.2[ppm]에서 방향족환으로 결합하고 있는 짧은 쇠 알킬기의 α 위 수소 및 6.5[ppm] ~ 8.0[ppm]의 방향족환을 이용하여 절연유의 종류를 구분할 수 있다.

시료의 Spectrum에서 0[ppm] 이외에도 흡수가 있고 6.5[ppm] ~ 8.0[ppm]에 흡수가 없으면 3종, 흡수가 있

면 1, 2, 4, 5종 이다. 그리고 2.5[ppm] ~ 4[ppm]의 흡수가 없고 3.8[ppm] ~ 4.2[ppm]의 흡수가 있으면 5종, 없고 그리고 6.5[ppm] ~ 8.0[ppm]의 흡수 강도가 크면 2종, 흡수 강도가 작으면 1종으로 된다.

그림 2는 시료의 $^1\text{H-NMR}$ spectra로, 위에서 언급한 해석 방법으로 1종에 해당된다.

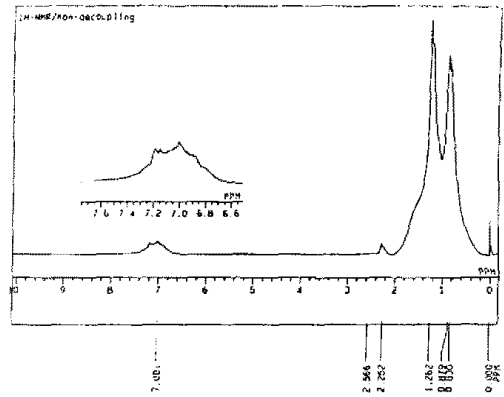


Fig. 2 Nuclear Magnetic Resonance of specimen

따라서 본 시료는 절연유의 7종류중 1종 광유에 해당된다.

3-2. 시료의 절연파괴 특성

그림 3은 실온에서 gap 변화에 따른 직류 및 Impulse 절연파괴 강도를 나타낸 그림이다.

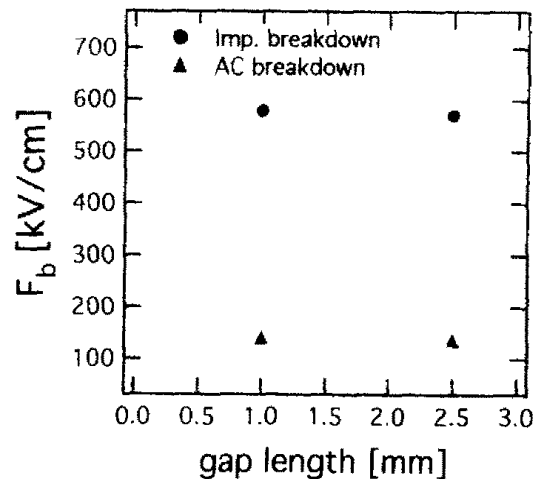


Fig.3 Gap length dependance of dielectric strength (AC, Imp.)

gap 길이 변화특성에서 gap을 1[mm]에서 2.5[mm]로 커짐에 따라 절연파괴 강도가 거의 일정한 것을 확인할 수 있다.

절연파괴 전압 V_{50} 는 gap 길이가 커지면 높아지지만, 절연파괴 강도 F_{50} 로 환산하면 거의 일정하나 약간 감소한다. 또한, 불평등 전계에서도 전극 간격이 커지면 최적 F_{50} 의 영향으로 절연파괴 강도는 적어진다.

그리고 절연파괴 강도는 AC보다 Impulse가 4배이상 큰 것을 알 수 있다. 이것은 절연파괴 실험시 전압 인가시간이 길어짐에 따라 F_{b0} 와 t (인가시간)의 관계에서 F_{b0} 는 T 의 $-1/4$ 승에 비례하므로 AC 절연파괴 강도는 Imp 절연파괴 강도보다 매우 적어짐을 확인할 수 있다.

그림 4는 탈기하지 않은 절연유의 AC 절연파괴 강도의 온도의존성을 도시한 그림이다. 그림에서 온도가 높아지면 절연파괴 강도 F_{b0} 는 온도 80[°C]까지는 서서히 증가되다가 80[°C] 이상이 되면 갑자기 커지면서 Peak를 나타낸 후 감소하는 특성을 나타낸다. HEINO는 절연유의 온도의존성에서 절연유와 전극을 충분히 탈기 시키면 절연파괴 전압은 온도의 영향을 받지 않는다고 보고했다.

그러나 실험시 탈기하지 않고 절연파괴 실험을 하였고, 또한 온도상승시 시료의 유동성이 좋아지므로 90[°C]까지는 절연파괴 특성이 우수해짐을 확인할 수 있었다.

鳥山은 변압기유에 대하여 상용주파수의 전압 인가시 절연파괴 특성을 연구하였는데 80[°C] ~ 90[°C]에서 파괴 전압이 극대로 됨을 보고하고 있다.

그리고, Clark는 온도를 여러종류로 변화시켜 공기의 용해도와 절연파괴 전압을 측정하였는데 절연파괴 전압의 최대값은 100[°C]에서 나타남을 보고하고 있다.

따라서, 본 실험의 경우 시료내의 용해된 공기가 온도가 높아짐에 따라 외부로 제거됨으로, 즉 탈기현상이 나타나므로 절연파괴 강도가 증가된다.

그러나, 90[°C]이상에서 절연파괴 강도의 감소는 액체 분자가 해리 되거나 전극으로부터 전자주입이 용이해져 전자적 파괴가 발생하기 때문에 절연파괴 강도는 감소된다.

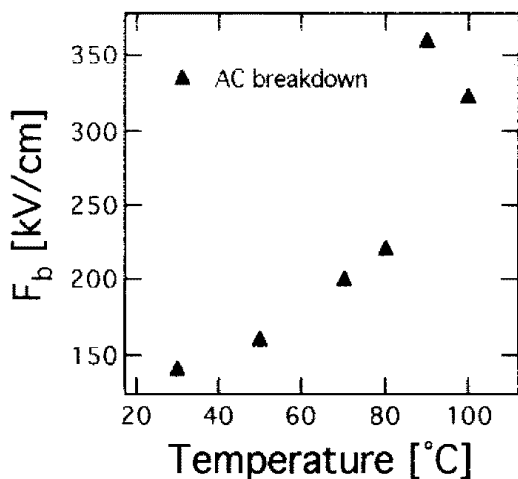


Fig. 4 Temperature dependence of dielectric strength in AC

그림 5는 인가전압이 Imp.로 절연파괴 강도의 온도의존성을 나타낸 그림이다.

그림에서 상온이상 70[°C]까지는 매우 급하게 증가되어 파괴강도 1400[kV/cm]에서 거의 일정한 포화특성을 나타내고 있다. 또한, 절연파괴 강도는 AC보다 매우 높음도

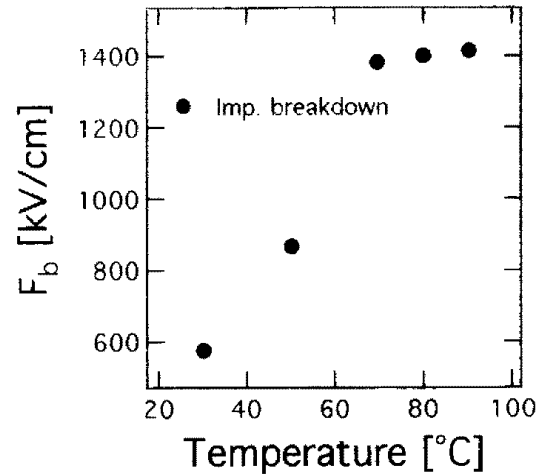


Fig. 5 Temperature dependence of dielectric strength in Impulse

확인할 수 있었다.

인가전압 Impulse 파형의 최대값을 지나서 최대전압의 50[%]로 되기까지의 시간, 파미장은 $1.2 \times 50[\mu s]$ 를 이용했다. 절연유속에 용해하고 있는 공기는 전계의 작용에 의해서 가스화가 쉬워지기 때문에 전극및 액체의 탈가스화 및 전자의 충돌전리를 파괴에 이르는 전자적 파괴의 음극 부근에 형성된 공간전하층이 음극에서 전자방출을 촉진시켜 파괴에 이른다.

한편, 파괴전압은 전압 인가와 동시에 발생하는 것이 아니고, 절연파괴까지 시간지연이 관측되는데 절연유의 경우 15[μs]의 크기를 갖는다고 보고하고 있다.

만약, 지연시간 τ [sec], 전극간격 l [cm], 파괴전계 E [V/m]라면 전하의 이동도 μ [cm²/Vs]는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\mu = l/E \cdot \tau$$

L. Brehmer는 LDPE의 전기전도 특성에서 $\mu=4 \times 10^{-9}$ [cm²/Vs]정도, Toureille는 PE에서 $\mu=1 \times 10^{-9}$ [cm²/Vs] 정도를 보고하고 있으나, 본 실험에서는 전극간격 1[mm] 때 온도 30[°C], 50[°C], 90[°C]로 높아짐에 따라 이동도 μ 는 2.36×10^{-4} [cm²/Vs], 6.95×10^{-5} [cm²/Vs], 7.2×10^{-5} [cm²/Vs]를 각각 얻었고, 그리고 전극간격 2.5[mm]때 8.03×10^{-5} [cm²/Vs]를 얻었다. 이값은 전기전도때 이동도에 비해 10⁴배 정도 큰 값을 확인하였다.

4. 결 론

변압기용 전기절연유의 AC 및 Impulse 절연파괴 특성을 연구한 결과

- 1) $^1\text{H-NMR}$ 과 IR 특성을 이용하여 제 1종 광유의 구분을 할 수 있었다.
- 2) gap 길이의 절연파괴 특성에서는 길이가 커짐에 따라 거의 일정하거나 약간 감소하는 경향이 있다.
- 3) AC 절연파괴 특성에서는 $90[^\circ\text{C}]$ 까지는 증가하고, 이상온도 영역에서는 감소됨을 확인하였다.
- 4) Imp. 절연파괴 특성에서는 $70[^\circ\text{C}]$ 까지는 증가되고, 그 이상 영역에서는 포화됨을 확인하였다.
- 5) Imp. 절연파괴 특성의 이동도는 약 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 정도의 크기를 갖는다.

본 연구는 1994년도 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

1. BEHROUZ ABEDIN : ELECTROSTATIC CHARGE RELAXATION IN TANK FILLING OPERATIONS, J. of Electrostatics, 14, PP 35 -57 (1983)
2. R. Tamura, Y. Miura et al : STATIC ELECTIFICATION BY FORCED OIL FLOW IN LARGE TRANSFORMER, IEEE TRANS. on Power Apparatus and Systems, PAS-99, 1, PP 335-343 (1980)
3. 大久保 仁, 寺西 常治: 油中絶縁における破壊と空間電荷, 静電気學會誌, 14.1, PP 16-24(1990)
4. M. IKEDA et al: Breakdown Characteristics of Moving Transformer Oil, IEEE Trans. on Power Appa. and Sys., Vol. PAS-100, 2, PP 921-928(1981)