

Fluorocarbon의 전기적 특성연구

논문
8-2-14

A Study on the Electrical Characteristics of the Fluorocarbon

허창수*, 조한구**

(Huh Chang Su, Cho Han Ku)

Abstract

In this paper, we investigated physical properties and electrical characteristics of the fluorocarbon that used as coolants for large power gas-insulated transformer. Volume resistivity of the fluorocarbon was $\rho = 1.87 \times 10^{15} [\Omega \cdot \text{cm}]$ at 1 atm, 27°C. Dielectric constant was 1.86 and decreases as temperature increase. The breakdown voltage at 1 atm was higher than that of transformer oil. The breakdown voltage of fluorocarbon vapor was about 18kV when pressure in a test chamber increases over 1kg/cm². When fluorocarbon was mixed with SF₆ gas, breakdown voltage of the mixed was higher than that of fluorocarbon. Then fluorocarbon leads to increase over 4kg/cm² in pressure as temperature increase. Therefore, when a gas-insulated transformer is manufactured, the design must be taken into consideration a high-pressure.

Key Words(중요용어) : Large power gas-insulated transformer(대용량 가스절연 변압기), Volume resistivity(체적저항율), Dielectric constant(비유전율).

1. 서 론

최근 수년간 PCB 변압기의 사용이 금지된 후 난연성 변압기의 필요성은 변압기가 도시근교의 인구 밀집지역 및 건물의 주위에 설치되면서 더욱 증대되고 있다. 지금까지의 변압기는 광유를 절연 및 냉각 매체로 사용하고 있어 전기적 단락사고에 의해 arc가 발생하는 경우, arc가 작은 경우 냉매인 oil에 의하여 소멸하게 되지만, arc가 큰 경우에는 oil의 90%가 폭발성가스로 변하여 변압기의 화재, 폭발 등의 재해를 유발시키는 경우가 있다.^{1,2,3)} 이러한 재해를 저감시키기 위하여 단락시 단시간 차단을 위하여 차단기 등 여러 안전장치를 부가시키고 있지만 변압기 설치의 가격상승의 요인으로만 작용할 뿐 완전한 대책은 될 수가 없다. 따라서 보다 근본적인 대책은 변압기 자체의 안전율을 향상시키는 일이며 이에 적합한 것이 SF₆ gas 변압

기이다. 또한 변전소의 total gas insulation화를 위하여도 변압기의 gas 절연화는 적절하다 하겠다.^{2,4)} 그러나 가스 자체만을 가지고 절연 및 냉각을 수행하는 경우 gas 압력을 상승시키면서 절연내력은 향상시킬 수 있으나 변압기 용량이 큰 경우 gas만의 냉각효과에는 한계가 있게 되어 전체 변압기 설계영역에 제한을 받게 된다.^{5,6,7)} 그러므로 절연과 냉각을 분리하여 절연을 SF₆ gas가 담당하고 냉각은 FC(fluorocarbon)이 담당하여 냉각특성 및 용량을 현격하게 증가시킨 복합 절연냉각식이 많이 연구되고 있는 실정이다.^{1,3)} 이는 냉각계통을 따로 구성하여 냉매인 FC를 노즐을 통하여 분사함으로써 coil 및 철심을 냉각하고 다시 이 냉매의 열을 열교환기를 통하여 외부로 방출시키는 방법으로 현재 외국에서는 이 방식으로 345KV의 수백 MVA의 변압기에 대한 연구가 진행중에 있다.^{6,8)} 그러므로 본 연구에서는 복합절연 냉각방식 변압기에서 냉매로 사용되는 FC에 관하여 교류전압 절연과괴 시험, 비유전율 측정, 체적저항을 측정 등을 통하여 전기적 특성을 고찰하였으며, 또한 변압기 운전 시 온도상승에 의해 야기될 수 있는 변압기에서 FC에 의한 압력상승의 정도 및 FC의 절연특성변

* : 인하대학교 공대 전기공학과

** : 한국전기연구소 절연재료연구실

접수일자 : 1994년 8월 30일

심사완료 : 1994년 12월 13일

화를 조사하여 실제 변압기설계시의 기초자료로서 활용될 수 있도록 하였다.

2. 실험 방법 및 장치

2.1. 절연파괴 시험

절연파괴 시험은 유전체의 절연성능을 평가하는 가장 기본적인 직접적인 방법의 하나로서 인가 전압의 형태에 따라 직류, 교류, 충격파(impulse)로 나누어진다. 본 연구에서는 이미 알려진 cathode나 anode에서의 절연 파괴 기구보다는 액냉식 변압기 설계의 기초자료로서 활용될 수 있도록 하기 위해 AC 절연내력을 조사하였다. 본 실험에서는 주파수 60Hz의 교류전원으로서 안정된 값을 얻기 위해 10~20회 반복, 실험을 하였으며, 시험 후 액체의 자체 절연회복을 돕기 위해 매 시험 후 액체의 유동이 충분히 이루어지게 했고 또한 시험시 액체의 유동에 의한 절연내력의 변화가 일어나지 않도록 하기 위해 외부의 충격을 없게 했다. FC의 절연내력시험 및 FC+SF₆ 혼합가스에서의 절연내력시험은 50,000V, 5000VA의 시험용 변압기를 이용하였으며, 침대 평관전극구조에서 침전극은 스테인레스 스틸, 평관전극은 황동을 사용하였고, 구대극 전극은 직경 12.5mm의 황동을 사용하였다. FC+SF₆ 혼합가스에서의 절연내력특성시험은 그림 1과 같은 압력용기를 사용하였고, 전극은 구전극으로 직경 12.5mm의 스테인레스 스틸을 사용하였으며, 마이크로미터로서 전극간 거리를 조정하였다. 시험은 먼저 용기를 깨끗하게 세척하여 이 물질이 들어가지 않도록 하였으며, 그 후 로타리 펌프를 이용하여 진공을 유지한 후 FC 1500cc를 주입하고 다시 SF₆가스를 넣어 용기의 전체 충전 압력이 1.2 KG/cm²가 되도록 하였다. 이 때 FC는 용기의 전체부피의 1/4(1.500cc)를 넣어 초기의 상온에서의 충전 압력을 1.2KG/cm²으로 하였는데 이는 온도상승시 압력상승을 고려하여 그 최대치를 고압용기의 규제를 받는 압력이하로 하기 위함이었다. FC 증기의 절연내력시험 역시 그림 1의 압력용기를 사용하였고, 전극간 거리는 1.25mm 띄어서 측정하였다.

2.2. FC의 비유전율 측정

FC의 비유전율 측정은 Precision capacitance and dissipation factor(tan δ) measuring bridge (Tettex, type 2809)를 사용하였다. 시료를 용기에 넣기 전에 용기를 아세톤으로 깨끗하게 세척을 했으며, 안전하게 건조시킨 후 액체시료를 넣었다.

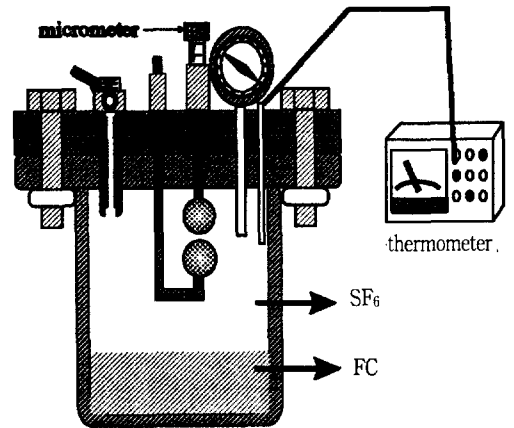


그림 1. 압력 용기
Fig. 1. Pressure chamber.

이때 시료의 양은 40cc였다. 비유전율의 온도시험은 주파수 60Hz, 1KV의 전압을 인가하였고 기준 온도는 25℃로 하였으며 이로부터 10℃ 간격으로 상승시켜 비유전율의 변화를 측정하였다. 그리고 전압의 변화에 따른 비유전율의 변화를 관찰하기 위해 250V 간격으로 상승시키면서 측정하였다.

2.3. FC의 체적저항률 측정

JIS규정(JIS C 2101)에 의하면 체적저항률 측정은 직편법과 직류충폭기를 사용하는 방법이 있으며, 전원장치는 건전지, 축전지 등의 직류전원을

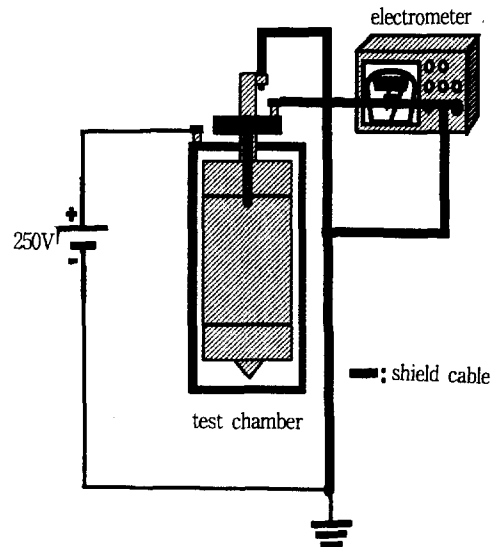


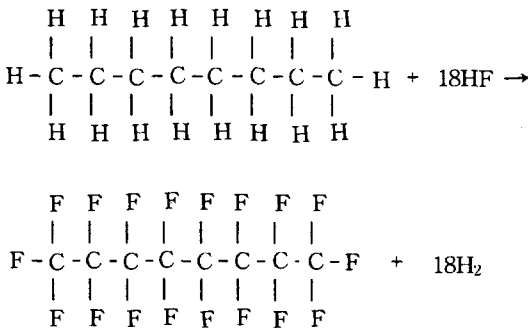
그림 2. 체적저항률 측정개략도
Fig. 2. Sch. representation of volume resistivity measurement.

사용하든가, 전압안정장치를 갖춘 맥동이 작은 정류전원을 사용한다고 규정되어 있다.⁹⁾ 본 실험에서는 JIS(C 2101)규정에 따라 직류 250V를 가하여 전압인가 1분후의 전류치로서 체적저항율을 구하였고, 측정법은 직류증폭기법으로 하였다. 실험장치는 일본 Dakeda Riken사에서 제작한 전원(TR 300C), Electrometer(TR8651), test cell을 이용하였다. 다음 그림 2는 체적저항율의 측정개략도를 나타낸 것이다.

또한 체적저항율측정은 온도와 습도에 따라 아주 민감한 영향을 받는데 본 실험에서는 이의 영향을 최소화하기 위해 초기온도 및 습도를 최대한 일정하게 유지하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

복합절연냉각식 변압기에서 냉매로 사용되는 FC는 불연소성에 무색, 무취의 투명한 액체이며 화학적으로 매우 안정한 액체로서 전기절연성도 매우 우수한 물질이다.¹⁰⁾ FC는 일반 유기화합물의 수소 원자를 전기 화학적 방법으로 모두 불소로 치환한 물질로서 그 과정은 다음과 같다.



이 화합물은 염소나 수소를 전혀 포함하지 않기 때문에 현재 환경 문제를 일으키며 사용하고 있는 hydrocarbon이나 chlorofluorocarbon등과는 전혀 다른 매우 안정하고 무해한 특성을 갖고 있다. 본 실험에서는 3M사에서 제조한 FC-77을 사용하였으며 이것의 물리적 특성을 표 1에 나타내었다.

3.1. FC의 절연내력 특성

FC의 절연내력특성은 아래 그림 3에서와 같다. 침 대 평판 전극에서의 절연내력 특성은 간극이 3[mm]까지는 절연파괴전압은 전극간 거리와 함께 상승하는 특성을 보이나 어느 정도 전계가 증가하면 거리에 따른 파괴전압증가율은 급격히 둔화되

표 1. FC(FC-77)의 물리적 성질

Table 1. Physical properties of fluorocarbon(FC-77).

Typical Boiling Point	97°C	Pour Point	-110°C
Density, 25°C	1.78g/cm ³	Vapor Pressure 25°C	42 torr
Density, -54°C	1.97g/cm ³	Refractive index 25°C	1.280
Heat of Vaporization at Boiling Point	20 g-cal/g	Specific Heat 25°C	0.25 g-cal/g-°C
Thermal Conductivity 25°C	0.00063 watts/(cm ²)(°C/cm)	Coefficient of Expansion	0.0014 cm ³ /(cm ³)°C
Surface Tension 25°C	15 dynes/cm	Volume Resistivity 25°C	1.9*10 ¹⁵ ohm-cm
Dielectric Strength 25°C	40 KV 2.54mm gap	Dielectric constant 25°C(1KHz)	1.86
Average Molecular Weight	415	Dissipation factor or 25°C (1KHz)	<0.0003
Solubility of Water 25°C	13 ppm(wt)	Solubility of Air 25°C	41 ml gas/100ml Liq
Kinematic Viscosity 25°C	0.8 cs	Kinematic Viscosity -54°C	6.9 cs

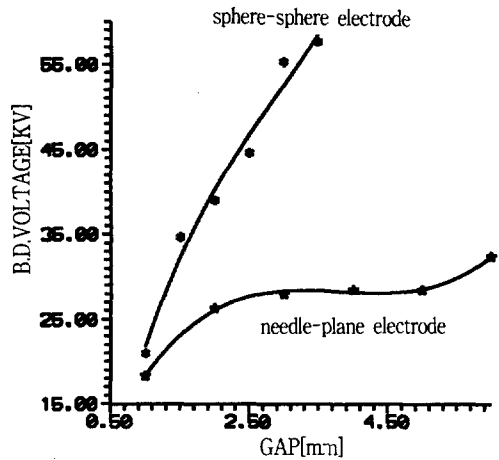


그림 3. FC의 절연 내력 특성

Fig. 3. AC breakdown voltage of the fluorocarbon.

고 그림에서처럼 파괴전압은 포화특성을 가진다. 계속해서 전극간 거리를 증가시키면 파괴전압은 다시 증가하게 된다. 이것은 침전극에서의 왜곡된 전계가 상승하여 어느 정도가 넘으면 전자의 주입으로 인한 전극의 연장과 같은 효과로 인하여 거리에 따른 절연내력의 증가가 나타나지 않으며, 이러한 전극연장효과는 액체내에서 무한히 성장할 수 없으므로 다시 파괴전압의 상승이 일어난다고 사료된다.¹¹⁾

절연유의 절연내력은 2.5mm의 전극간극에서 정현과 교류전압의 실효치로 30kV이상이라고 규정되고 있으나 새로이 잘 정제된 신유는 거의 50kV 이상의 절연내력을 갖는다고 보고되고 있다.¹²⁾ 본 실험에서 사용한 FC에서의 구대구 전극간극에서의 절연내력특성은 그림 3에서도 알 수 있듯이 절연유보다 우수한 절연내력특성을 가지고 있음을 알 수 있으며, 파괴전압은 극간 거리가 증가하면서 비례하게 증가하는 특성을 보인다. 본 실험에서는 절연파괴시험을 3.5mm까지만 하였으며, 그 이상의 거리에서 절연파괴시험을 하기 위해서는 전원장치의 교환이 불가피하나 유입에너지의 차이가 있어 3.5mm까지만 실험을 행하였다.

3.2. FC+SF₆가스에서의 절연내력특성

실제의 가스변압기에서 FC는 SF₆가스와 함께 쓰여 냉각을 담당하게 된다. FC는 끓는점이 97℃ 이나 취발성을 지니고 있어 상온에서도 증발한다. 이러한 FC가 변압기의 tank에서 사용될때 온도가 상승함에 따라 높은 압력상승을 유발하게 된다.¹³⁾ 실제로 FC는 SF₆ 가스와 함께 사용되어 변압기에 적용되므로 본 연구에서는 FC와 SF₆가스가 서로 공존할 때의 온도에 따른 압력변화와 절연내력 시험을 하였다. 다음 아래의 그림 4에서 FC, SF₆가스, FC+SF₆가스의 온도에 따른 압력변화를 나타내고 있다.

그림 4에서 FC는 상온 20℃에서부터 증발하기 시작하여 100℃부근에서는 1.5기압 이상의 압력상승을 유발하며 이에 반해 SF₆가스는 온도가 상승

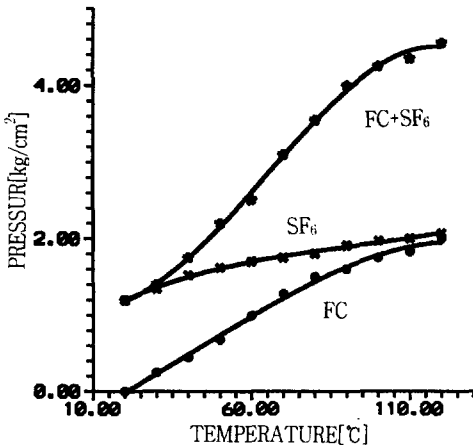


그림 4. FC, SF₆, FC+SF₆가스의 온도상승에 따른 압력의 변화

Fig. 4. Change of pressure as a function of temperature at FC, SF₆, FC+SF₆

함에 따라서 0.5 기압정도 상승하는 것을 알 수 있다. FC와 SF₆가스가 공존할 때의 온도상승에 따른 압력의 변화는, 위의 그림 4에서 온도가 증가하면서 증가하다가 50℃를 지나면서 더 큰 압력변화를 보이고 있으며, FC와 SF₆가스의 분압의 합으로 나타난다. FC와 SF₆가스가 공존할 때의 압력변화곡선은 처음의 낮은 온도(약 40℃까지)에서는 비교적 완만한 곡선을 나타내는데 이는 FC의 증발량이 미미하기 때문이며, FC내에 용해되어 있던 SF₆가스는 온도가 증가하면서 FC 밖으로 나와 FC의 증발이외의 압력상승요인으로 작용하여 40℃~80℃ 범위에서 보다 큰 압력상승을 유발한다. 또 더 높은 온도에서의 압력상승의 원인은 주로 FC의 증발에 기인한 압력상승이라고 사료된다.

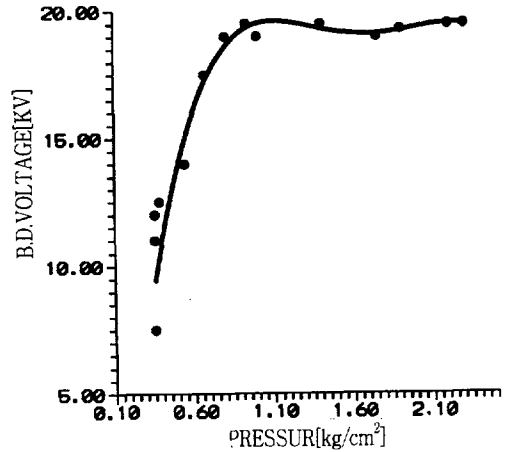


그림 5. FC증기의 파괴전압(구전극, 전극간 거리 1.25mm)

Fig. 5. Breakdown voltage of the FC vapor(at sphere electrodes, 1.25mm gap).

그림 5에 전극간 거리 1.25mm에서 FC 증기의 파괴전압을 나타내었다. FC증기의 파괴전압은 온도가 증가하면서 FC의 증발로 용기내의 압력이 증가하는데, 이 압력에 따라 파괴전압은 증가하다가 0.8 기압 이상에서는 더 이상 증가하지 않고 포화되는 특성을 보인다. 이것은 FC가 포화증기압에 도달하여 더 이상 밀도증가가 일어나지 않기 때문에 파괴전압도 증가하지 않는 것이라 사료된다. FC+SF₆ 혼합가스에서의 절연내력은, 그림 6에 나타난 것처럼, 압력과 전극간 거리에 따라서 변화하며 압력의 증가와 함께 증가하다가 포화되는 특성을 보이고 전극간 거리의 증가에 따라 절연내력은 증가하는 특성을 보인다.

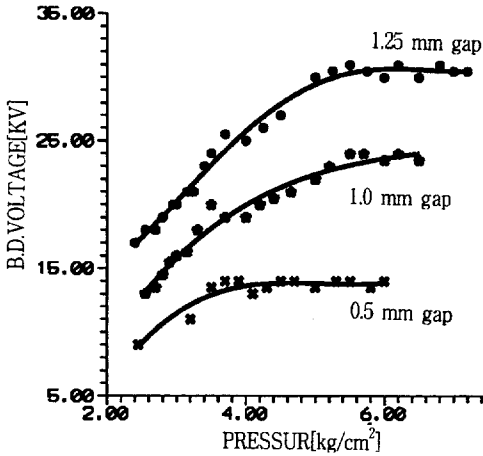


그림 6. FC+SF₆ 혼합가스의 파괴 전압(구전극)
 Fig. 6. Breakdown voltage of the mixtures of vapor with SF₆ gas(at sphere electrodes).

3.3. FC의 비유전율 측정

25℃에서 bridge의 test cell(Tettex, type 2903 guard-ring capacitor)에 FC를 넣지 않았을 때의 정전용량(C₀)은 C₀=56.4762[pF]이었고, FC를 채운 후의 정전용량(C)의 변화로서 FC의 비유전율을 $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$ 식에 의하여 계산하여 그 변화를 그림

7, 그림 8에 온도 및 전압에 대한 변화로 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 비유전율은 온도에 반비례하는 특성을 보이는데 이는 정전용량이 분극과 관계하기 때문이라 사료된다. 즉 유전체에 전계를 가했을 때 그 각 분자들은 전계의 방향으로 배향하려는데 온도가 증가하면서 액체의 분자들이 열 진동을 하여 이 열 진동이 쌍극자의 배향을 방해하여 분극은 감소하고, 따라서 정전용량이 감소하여 비유전율은 감소하는 특성을 보인다고 사료된다. 그리고 전압의 변화에 따른 비유전율의 변화를 관찰, 측정하여 이를 그림 8에 나타낸 바와 같이 전압의 변화에는 비유전율의 변화가 이루어지지 않는데 이는 분극이 전압과는 무관하기 때문에 전압의 변화에는 비유전율의 변화가 없는것이라고 사료된다.

3.4. FC의 체적저항을 측정

액체의 체적저항율이란 그 액체에 가한 직류전계와 그 때 액체중에 흐르는 단위면적당의 전류와의 비로서 나타낸다. JIS(C 2101)규정에 의하면 체

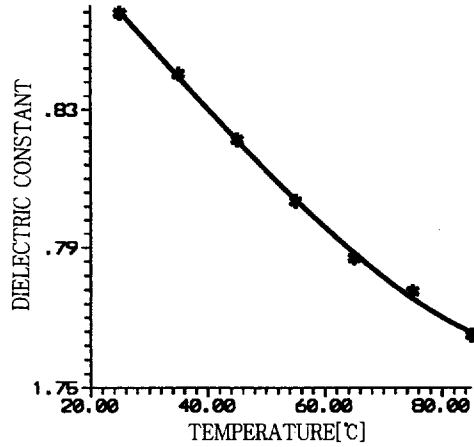


그림 7. 비유전율의 온도 의존성
 Fig. 7. Dependence on temperature of dielectric constant.

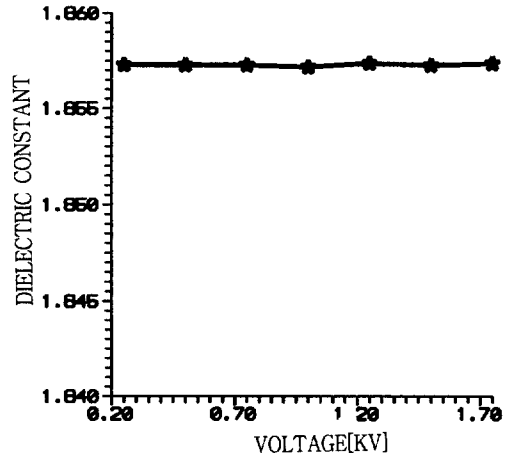


그림 8. 비유전율의 전압 의존성
 Fig. 8. Dependence on voltage of dielectric constant.

적저항율은 전압인가 직후의 여러 흡수전류 등의 요인을 제거하기 위하여 전압인가 1분후의 전류치로서 계산된다.¹⁰⁾ 다음 그림 9는 전압 인가후의 전류의 변화를 나타낸 그림이다.

체적저항율은 직류증폭기법으로 측정할 때 다음 식으로 계산된다.

$$\rho = 3.6\pi CR_x \tag{1}$$

단 여기서 ρ : 체적저항율[Ω cm], C : 시료를 넣지 않은 상태의 전극간의 정전용량[pF], R_x : 시료의 저항치[Ω] 이다. 위 식에서 3.6 π C는 전극계수

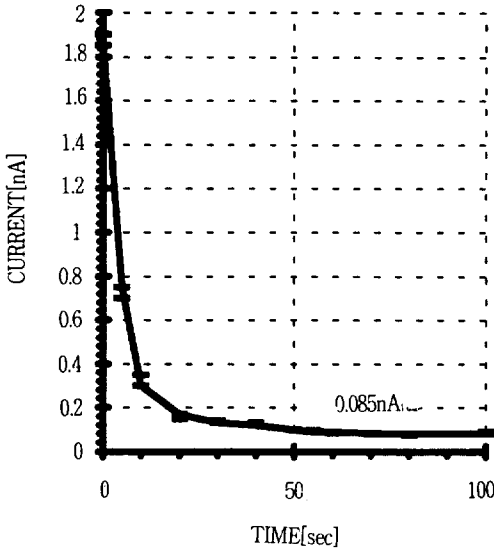


그림 9. 전압 인가 후의 전류치
Fig. 9. Current value after voltage applied.

로서 본 실험장치에서는 637이다. 식(1)로서 체적저항율을 구하면 $\rho = 1.87 \times 10^{15} [\Omega \cdot \text{cm}]$ 로서 나타났다. 이 결과는 표 1에 나타난 값과 일치한다. 본 실험에서 측정시 온도는 27°C이었는데 일반적으로 체적저항율은 온도가 상승하면서 감소하는 특성을 보이며, 또한 인가전압에 의해서도 체적저항율은 변화하는데, 인가전압이 증가하면 체적저항율은 증가하게 된다. 그림 9에서와 같이 전압인가 후 전류는 급격히 저하하여 서서히 일정한 값에 도달하게 되는데 이러한 전류를 흡수전류라 하며, 이러한 흡수전류의 원인으로는 쌍극자 배향전류, 간극사이의 전하밀도의 저하, 전극계면의 공간전하 형성에 의한 전계의 왜곡 등이 있다.¹²⁾ FC와 같은 고저항의 액체유전체에서 전압원을 순간적으로 제거한 경우 역방향의 전류가 감지되지 않는 것으로 보아 쌍극자 배향전류의 영향은 생각하기가 어렵고, 또한 전극계면의 왜곡에 의한 전류의 변화라 보기도 어려워, 그림 9와 같은 전류의 변화특성을 보이는 원인은 전극 간극사이의 전하밀도의 감소에 의한 것이라 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서 복합절연냉각방식 변압기에서 냉매로 사용되는 FC(fluorecarbon)의 전기적 기초 특성을 조사, 고찰하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. FC의 비유전율은 1.86으로 조사되었으며 온도의 증가에 따라 감소하는 특성을 보였고, 전압에 따른 비유전율의 변화는 미세하여 관찰되지 않았으며, 체적저항율은 $\rho = 1.87 \times 10^{15} [\Omega \cdot \text{cm}]$ 이었다.
2. FC의 절연내력은 1.25mm 간격에서 30kV이고, FC증기의 절연내력은 온도상승에 따라 압력이 1기압 이상 상승되었을때 18kV이었다. 또한 FC는 온도상승에 따라서 2 kg/cm²이상의 압력상승을 유발하는 것으로 나타났다.
3. FC와 SF₆가스가 혼합되었을때 끓는 점을 지나면서 4 kg/cm²이상의 압력상승을 나타내고, 이때의 절연내력은 액체 FC나 증기일 경우보다 우수한 것을 알 수 있었다.
4. FC는 온도가 증가하면서 높은 압력상승을 유발하기 때문에 가스변압기 설계시 기존의 변압기 설계기준은 적용될 수 없고 기계적으로 고압용기의 설계에 근거해야함을 확인할 수 있었다.

※ 본 연구는 1993년도 한국전력공사의 지원에 의하여 수행 되었음.

참 고 문 헌

1. 所和廣 外3, “蒸發冷却式 가스絶緣變壓器の開發と變電所ト-タルガス絶緣化” OHM, 81/9 pp. 18-22.
2. R.H Holister “Gas vapor and fire resistant transformers” CH 1510-7/79, pp. 239-242, 1979.
3. 前田忠就, 玉置榮一, “가스絶緣變壓器の開發動向” 일본전기학회, 昭 61-6, 106권 6호, pp.538-541
4. John R. Mopies, Sanborn F. Philip “A new concept for a compressed gas-insulated power transformer” 7th IEEE/PES Trans And Distri. Conference and exposition, April-6 pp. 176-183, 1979.
5. K. Goto, “Development of insulation technology for high-voltage gas-insulated transformer” IEEE Trans. on PD, Vol. 4, No. 2, pp. 1096-2004, 1989.
6. K. Tokoro, “Development of 77KV 40MVA gas-vapor cooled transformer” IEEE Trans. on power apparatus and systems, Vol. PAS-101, No. 11, pp. 4341-4349, November

- 1982.
7. Y. Harumoto et al, "Development of 275KV EHV class gas-insulated power transformer" IEEE Trans on power apparatus and systems, Vol PAS-104, No 9, pp. 2501-2508 september 1985.
 8. K. Goto, T. Yamazaki "Studies on structural integrity for seperate-cooling/sheet-winding gas insulated transformer" IEEE Trans. on power delivery, Vol 4, No 2, pp 1079-1085, April 1989.
 9. JIS C 2101-1982, pp 37-43
 10. T. Takagi et al, "Basic insulation characteristics of perfluorocarbon for large power transformers" IEEE Trans. on power delivery, Vol 3, No 4, pp 1809-1815, October 1988.
 11. A.H. Sharbaugh et al, "Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquids" IEEE Trans, Electr. insul, Vol EI-13, No 4, pp. 249-276, August 1978.
 12. 土江基夫 外1 "絶縁油の電気傳導" EIM-84-84, pp 59-67
 13. A.H. Sharbaugh, P.K. Watson, "Breakdown strengths of a perfluorocarbon vapor(FC-75) and mixtures of the vapor with SF₆" IEEE Trans. on power apparatus and systems, Vol PAS-83, No 2, pp 131-136, February 1964.

저자소개

허창수



1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대학교 대학원(석사). 1987년 인하대학교 대학원(공학박사). 1988년-1993년 한국전기연구소 기능재료연구실 실장. 1995년 현재 인하대학교 조교수.

조한구



1959년 4월 14일생. 1984년 성균관대학교 공대 전기공학과 졸업. 1987년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 성균관대학교 대학원 전기공학과(박사). 1984년 한국화약(그룹) 한양화학 입사. 1987년 한국전기연구소 전기재료연구부 선임연구원. 현재 한국전기연구소 전기재료연구부 절연재료연구팀 선임연구원.