

FLUOROCARBON 에서의 변압기 권선 절연용 PET 필름의 전기적 특성연구

논문
9-5-8

Electrical Characteristics of PET Film for Wire Insulation of Transformer in Fluorocarbon

허창수*, 이재복**
(Chang Su Huh, Jae Bok Lee)

Abstract

Power transformer have many unsymmetrical structure and electric field is enhanced in that area. Those unsymmetrical area are not covered oftenly by solid insulating material which is used as a framework specially in gas transformer. By that result there is a possibility to decrease the total insulation class of the transformer. So in this study the electrical characteristic of FC+SF₆ mixture gas which is used as coolants for large power gas insulated transformer and its effects on electrical characteristics of structural material are investigated. Also breakdown characteristic with the tension of taping and curvature of the coil are studied which could be used as a design factor of large power transformer.

Key word(중요용어) : gas transformer(가스 변압기), fluorocarbon(FC), PET film(PET 필름), dielectric strength(절연내력)

1. 서 론

전력 공급의 주요 설비들은 전력 수요의 증가에 따라서 고전압 및 대용량화가 추진되고 있으며 또한 대도시의 밀집화로 인한 도시 근교의 대용량 변전소 건설에 따른 적절한 형태의 전력기들이 개발되고 있다. 이에 따라 변압기도 고압 대용량화가 추진되며 이에 따라 GIS 와의 Total gas insulation 을 위한 가스 변압기의 개발이 활발히 진행되고 있는 실정이다. 특히 근래에는 인구 밀집 지역에 대전력을 공급하여야 하기 때문에 화재, 폭발에 대한 안정성 보장 및 설치 장소의 용지비와 기반공사등에 많은 문제가 제기되 난연성 변압기의 소형 경량화가 절실히 요구되고 있는 실정이다. SF₆ 가스 변압기는 광유 변압기에서 문제가 된 제반 이러한 사항 등을 해결할 수 있는 변압기로서 절연 특성이 우수하고 크기에 제한을 받지 않고 설계를 함으로서 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 변압기는 일반적으로 절연 물질이 냉

각도 같이 담당하고 있으며 기존의 변압기는 공기나 광유를 사용하였으나 난연성이 요구되거나 변압기의 용량이 더욱 증가하는 경우는 SF₆ 가스에 의한 절연과 냉각을 분리하여 증발잠열이 큰 냉매를 별도로 이용하여 용량 증가를 꾀하고 있다^{1,2)}. 증발냉각 매체로서 사용 가능한 물질은 표 1에 표시되어 있으며 이의 선정은 그 동안은 가격 등에 의해 좌우 되어 왔으나 현재는 환경 보호 측면에서 인체에 무해하고 환경오염이 적은 것이 선정이 되고있다. 현재 대용량 변압기의 냉각 물질로 사용되는 것은 fluorocarbon (C₈F₁₆O : FC) 라는 물질로서 냉각 방식은 이 FC를 노즐을 통하여 분사하여 mist로 한 다음 가스와 함께 순환케하여 냉각하는 방법과 mist 가 아닌 drop 상태로 권선 및 철심에 FC를 낙하시켜 온도 상승 부위에 접촉함으로써 증발잠열로 냉각 작용을 하는 방법 등이 있다. 현재 많은 연구가 drop 낙하 방식을 취하고 있으며 이의 연구를 위하여 sheet winding, 펌프를 위시한 순환구조 등이 연구되고 있다.

자냉식의 경우는 온도 상승으로 인한 압력 상승을 고려하여 1.2 kg/cm² 으로 충전하고 있으며 FC를 충전하는 경우는 FC의 분압이 작용하여 이

* : 인하대학교 전기공학과

** : 한국전기연구소

접수일자 : 1995년 12월 29일

심사완료 : 1996년 6월 10일

보다 압력이 증가하게 된다.^{2,3)} 본 연구에서는 그동안 국내에서 개발이 미진한 증발냉각식 변압기 개발을 위하여 먼저 증발잠열이 큰 냉매로서 환경오염이 적어 호평을 받고 있는 FC의 전기적 절연 특성과 SF₆ 가스 와 혼합사용시 변압기의 구조재료등의 전기적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 압력 조절용 내전압 시험장치를 제작하여 혼합가스의 전기적 절연특성을 조사하였으며 또한 PET 필름의 시편 및 실제 권선에 대하여 유전을 및 내전압시험을 시행하였다.

표 1. 변압기 냉각냉매의 물리적 특성

Table 1. Physical characteristics of coolant for transformer

재료명	비점	밀도	빙점	절연내력	비고
C ₈ F ₁₆ O	102	1.78	-113	54	고가
(C ₄ F ₉) ₂ O	97	1.70	-100	45	고가
C ₂ HCl ₃	87	1.64	-87	50	저가
C ₂ Cl ₄	121	1.62	-23	50	저가
C ₂ H ₃ Cl ₃	75	1.32	-37		저가

2. 실험방법 및 장치

변압기는 다른 전력 기기와는 달리 비대칭성의 부분이 많이 존재하고 가공을 하기 어려운 부분이 많아 전개집중 부위가 많아진다. 또한 가스 변압기는 고체 충전물에 의해 이 부분은 보호하지 않고 그대로 가스 중에 노출함으로써 전체적 변압기 절연 특성에 크게 영향을 미친다. 특히 문제가 되는 부분은 권선의 모서리 부분, tap 등의 lead선 연결 부분, 사용된 절연 재료 필름에 존재하는 작은 구멍등이 문제가 된다. 이러한 제반 사항을 조사하기 위하여 다음과 같은 연구를 진행하였다.

2.1. SF₆ + FC 의 절연특성

SF₆ + FC 가 혼합냉매및 절연 매체로 사용되는 경우 변압기 외함은 온도 상승에 따른 증발로 부피팽창을 유발하여 압력을 상승시키는 원인이 된다. SF₆ 가스는 온도 상승에 의하여 부피팽창을 하지만 FC 는 상압에서는 약 50℃ 에서 기화하게 되어 매우 높은 압력 상승을 유발한다. 이러한 압력 상승 시의 현상을 연구하기 위하여 그림 1 과 같은 압력 용기를 제작하여 실험하였다.

.초기 상온에서의 전체 충전압력은 1.2 kg/cm² 으로

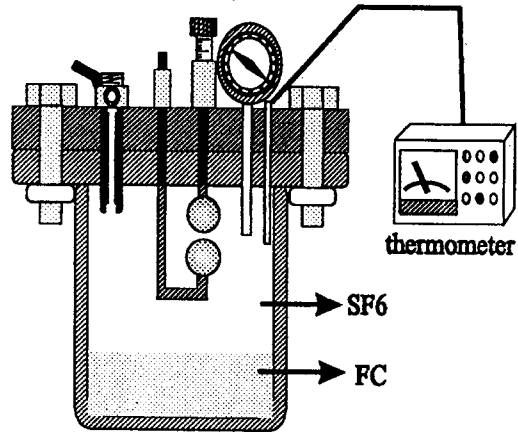


그림 1. 압력 조절용 내전압 시험장치

Fig. 1. Pressure regulated test chamber

하고 있는데 이는 온도상승시 압력상승을 고려하여 그 최대치가 고압 용기의 규제를 받는 압력 이하로 하기 위함이었다. 가스만을 충전하였을 경우 변압기 운전 온도를 고려하였을 때 2 kg/cm² 의 상승을 보임으로서 고압 용기의 규제를 받지 않을 수 있으나 FC 를 충전하는 경우 증발 압력이 급격하게 SF₆ 가스압에 더해져 급격한 압력상승을 초래한다. 따라서 복합 절연의 형식을 취하는 변압기는 고압 용기로서 취급되어 설계 되어야 할 것이다. 이 혼합 가스 중에서의 절연 파괴 특성 연구는 12.5 mm 의 구 전극을 가지고 시험하였다. 전극은 micrometer에 연결되어있어 가스가 충전된 후에도 전극을 조절할 수 있어 전극 간극에 따른 절연 파괴 현상을 연구할 수 있도록 하였다.

2.2. SF₆ + FC 가스 중의 소선 절연물의 절연 특성

이 가스 변압기 절연에는 SF₆ 가스 절연 이외에 지지 및 권선 피복을 위한 고체 절연물이 필요하게 되는데 kraft paper 대신에 polyester film과 polyester spacer가 이용되고 있다. 이외에도 다른 고분자 재료들이 lead 선 등과 같은 부위의 지지에 사용되며 선택은 흡습도에 의하여 결정하게 된다. 주로 사용되는 재질들의 특성을 표 2 에 나타내었다. kraft paper도 절연유 중에서는 건조후 유에 함침되기 때문에 흡습이 억제되어 양호한 절연 특성이 나타나나 가스 변압기에 사용하는 경우는

습기가 포함된 경우에 직접 노출이 되므로 문제가 된다. 표 2 에서 보는바와 같이 PET 필름이 PP 나 PE 보다 tensile strength 나 tear propagation resistance가 우수하기 때문에 변압기 도체처럼 각형권선의 taping에 훨씬 유용하다.

이러한 고체 절연물과 가스 절연물을 함께 사용하는 경우 가스는 절연재료와 냉각 매체로서, 고체 절연물은 절연 및 구조 재료로서 사용되기 때문에 절연층면에서는 복합절연으로 간주할 수 있다. 일반적으로 고체 절연물은 가스에 비하여 절연 내력이 높고 실용상 약 2 배의 절연내력을 갖고 있기 때문에 절연구성중 고체 절연물의 비율이 크면 그만큼 절연 내력을 향상시킬 수가 있다. 그러나 고체 절연물의 비율을 증가시키면 고체 절연물과 가스 절연물의 유전율차이로 인하여 전계가 유전율이 낮은 가스 간극에 집중하게 되어 부분방전을 유발시킬 위험이 있다. 따라서 이들을 선정할 때 주의 사항으로서는 과전부의 전계집중을 방지하기 위하여 과전부의 침예한 부분이 발생하지 않도록 하며 가능한 한 고체 절연물로 피복하도록 한다.^{4,5)}

표 2. Polymer의 제특성

Table 2. General characteristics of insulating polymer materials

Material	Polyester PET	Polypropylene PP	Polyethylene PE	Kraft paper
Tensile Strength (kg/mm ²)	22	18	2	10
Elongation(%)	110	100	300	3
Tear propagation resistance (kg/mm)	22	14	1.5	-
Dielectric constant	3.0	2.0	2.2	2.0
Thermal conductivity (kcal/mhr°C)	0.14	0.12	0.39	0.11

고체 절연물은 가능하면 등전위면에 따라서 배치하도록 하여 연면방전이 발생하지 않도록 한다. 가스 단독으로 긴 절연 거리를 담당하는 것보다 고체 절연물을 barrier 로서 삽입하는 것이 절연 파괴 전압의 향상에 크게 도움이 된다.

이러한 사항을 고려하여 가스변압기의 coil 의 지지와 소선 간의 절연을 위하여 PET를 선정하여 특성을 조사하고 권선을 감았을 경우의 특성을 알기 위하여 권선에 PET 필름을 감은 시편을 제작하여 시험을 하였다. 시편은 권선과 권선 사이의 절연내력시험을 목적으로 하였으나 권선 간의 접촉은 변동 인자가 크게 작용하기 때문에 균일한 평판 전극에 시편을 접촉함으로써 한 권선의 소선 절연특성을 SF₆ + FC 가스 충전압에 따라 평가하였다.

소선 시편의 제작은 권선기를 수시로 이용하여 제작하기 어렵기 때문에 시편용 권선기를 설계 제작하였다. 이 권선기를 이용하여 taping 장력, tape 폭 등을 변화시킬 수 있었으며 제작된 시편 형상과 전극 배치는 그림 2 와 같다. 시편이 평판 전극과 접촉하는 곡률반경은 예상 변압기 권선의 곡률을 고려하여 결정하였다.

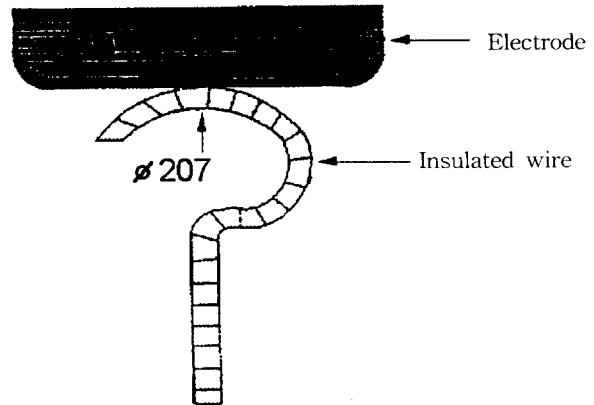


그림 2. 시편 형상

Fig. 2. Configure of coil specimen

2.3 PET 필름의 유전특성 시험

SF₆ + FC 중의 고체 절연물의 특성 변화를 평가하기 위하여 FC 에 함침된 재료를 온도와 압력을 변화시켜 가면서 유전율의 변화를 시험하였다. test chamber 는 가온, 가압, 분위기 가스의 충전등을 할 수 있도록 제작된 Tettex 사의 고체 유전체의 유전율 측정 장치를 사용하였다.

3 시험결과 및 고찰

3.1, SF₆ + FC 혼합 가스의 절연특성

그림 3에는 일정 전극 간극(0.5, 1.0, 1.25 mm) 하에서 압력 및 온도를 변화시키며 실험한 결과를 나타내었다.

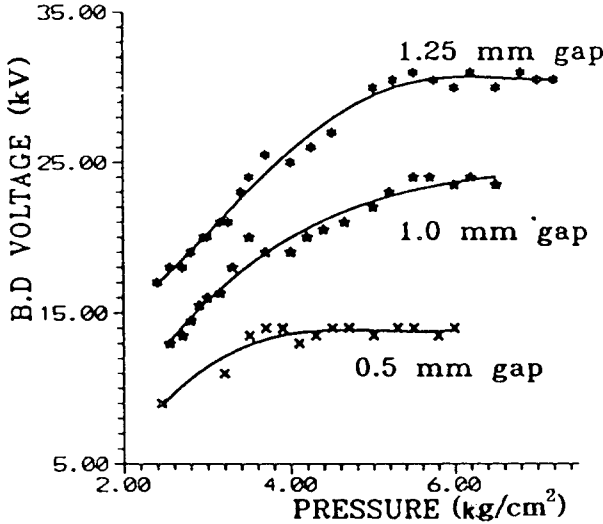


그림 3. SF₆ + FC의 증기압 변화에 따른 절연과피 특성

Fig. 3. Breakdown characteristics of SF₆ + FC with the pressure variation

1회 실험이 끝나고 전극의 간격이 조정될 때는 계속된 방전에 의한 전극의 손상 및 표면의 오염을 제거하기 위하여 연마 및 세척해서 사용하였다. 세척 전에는 전극의 표면을 미세 관찰하여 전극의 손상이나 기타 원인에 의한 절연과피인가를 확인하며 실험하였다. 시험전압은 50 V/sec 정도로 인가 전압을 서서히 올려 통계적 지연시간 효과를 제거하며 실험하였다. 전극은 12.5 mm 직경의 구를 1.25 mm 떼어서 실험한 결과이다.

그림 4에 표시한 것은 SF₆ 가스, 공기, 광유의 압력에 따른 절연내력의 변화를 보인 것이다. SF₆ 가스와 공기는 압력과 함께 절연내력이 상승하나 광유는 비압축성이므로 압력에 따라 변화하지 않고 일정한 값을 나타내고 있다. 압력이 대략 1.2 kg/cm² 정도이면 SF₆ 가스의 절연내력이 광유와 비슷한 값을 갖게 되어 통상 가스 변압기의 충전압력을 이 값으로 하고 있다. 그림 3과 반경 10 mm의 구로 10 mm 간격에서 실험한 결과로서 전극 계가 다르므로 일률적 절대 값의 절연내력은 비교하여 말할 수 없지만 압력과 함께 절연내력의 상승률은 유사한 특성을 나타

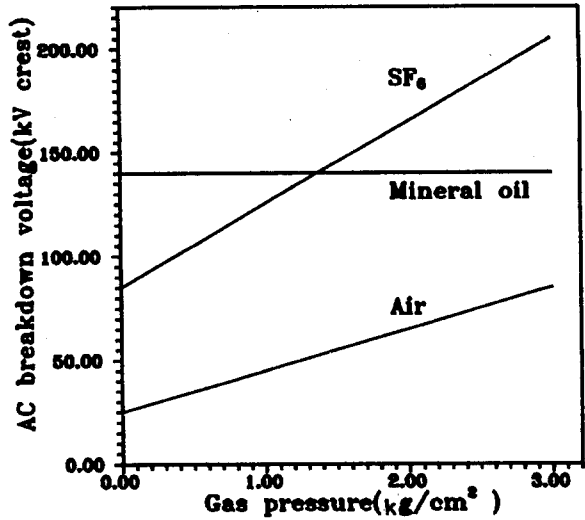


그림 4. SF₆ 가스의 AC 절연과피 특성⁽⁶⁾

Fig. 4. AC breakdown characteristics of SF₆ gas

내고 있다. 절연내력의 상승률은 SF₆ 가스만의 것보다는 완만하게 증가하는 데 이것은 그림 4에서는 온도를 일정히 하고 압력을 증가시킴으로서 밀도가 증가한 경우이고 그림 3은 한번 가스와 FC를 충전한 뒤 온도를 상승 시키며 압력을 상승시켰기 때문에 초기 값은 같을 것으로 사료되나 압력이 상승함에 따라 FC 증기의 분압은 올라가고 SF₆ 가스의 밀도는 일정함으로서 SF₆ 가스 분압이 상대적으로 저하하여 압력 상승 효과가 FC 만에 의해 이루어지기 때문인 것으로 사료된다.²⁾ 순수한 FC 증기만의 절연내력 실험은 더 보완되어야 하겠지만 이 결과로 보아 FC 증기가 SF₆ 가스 보다 절연내력이 높지는 않은 것을 알 수 있다. 따라서 냉각 DUCT 및 FC 노출의 설계 시는 각별한 주의가 요망된다.

3.2. SF₆ 중의 고체 절연물의 절연특성

변압기 코일의 지지와 소선간의 절연특성을 평가하기 위하여 모서리가 가공된 10.5 x 3.6의 각선에 0.3 mm의 PET 필름을 taping하여 그림 2와 같은 시편형상을 제작하여 AC 내전압 시험을 시행하였다. 시험은 SF₆ 가스를 충전하여 시험한 결과 1.2 kg/cm²의 압력 하에서 초기 절연과피가 17 kV 정도의 양호한 특성을 나타내었으며 계속하여 전압을 반복 인가 하였을 때 5-6회까지 9-10 kV의 절연내력이 유지돼 가스 충전에서 절

연회복이 매우 양호한 것을 확인하였다. 따라서 소선 간의 절연을 PET 로 선정하는 경우 절연내력 특성은 기존의 변압기보다 우수하게 안전율을 향상시킬 수 있으며 가스 변압기의 절연측면에서 가장 취약한 impulse 특성도 보완 할 수가 있다. 이 절연과피 전압에 미치는 인자는 여러 가지가 있을 수 있으나 같은 절연체의 경우 가스의 충전압, 권선의 곡률, taping 필름의 장력 등을 고려 할 수가 있다. 곡률을 일정히 하고 taping 의 장력을 변화 시켰을 경우 표 3 에서 보는 바와 같이 4 kg 인 경우는 평균 17.5 kV 이나 2 kg 인 경우는 평균 12 kV 로 절연과피 전압의 현저한 저하가 발생하고 있다. 이러한 이유는 시편에서 관찰되는 바 tension이 적은 관계로 PET 필름 taping 시에 주름이 많이 발생된 것을 알 수 있었다.

표 3. 소선 절연물의 가스 충전압에 따른 절연과피 특성 (50 °C)

Table 3. Breakdown characteristics of wire depending on gas pressure

Gas 압 tension	0.8 kg/cm ²	1.0 kg/cm ²	1.2 kg/cm ²
2 kg	11 kV	12 kV	12 kV
4 kg	17 kV	17.5 kV	17.5 kV

또한 절연과피 부위도 전극과의 접촉면이 아니라 접촉면 안쪽에서 발생하는데 이는 전선에 곡률 제작시 외측 즉 접촉면은 팽창에 의해 주름이 감소하여 공극이 줄어든 반면 내측은 주름이 증가하여 내측 모서리에 취약부위가 형성되고 공극이 크게 만들어지기 때문이다. 이 경우 가스의 충전압은 0.8 -1.2 kg/cm² 까지는 절연과피에 크게 영향을 미치지 않는 것을 실험에서 알 수 있다. 실험 결과의 변수 중 taping 시의 장력이 절연과피전압에 가장 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 가스 변압기의 대량생산시에는 절연 필름의 taping 보다는 coating을 시도하는 것이 바람직하다고 사료된다.

권선의 곡률은 절연과피 전압에 크게 영향을 미치게 되는데 변압기에 사용되는 권선의 최소 반경은 변압기 설계에 의해 계산된 철심을 감싸는 최외각 원주의 반경에 권선보호재 및 절연재 duct 의 폭을 더한 반경이 된다. 본 연구에서는 추후의 연

구를 위해 최소 반경을 207 mm 로 제작 시험하였다. 일반적인 경우에는 권선의 곡률이 계속작아지는 경우 절연내력이 급격히 저하하는 임계점이 존재하게 될 것이므로 요구되는 절연계급과 이 값을 절충하여 권선의 설계를 할 필요가 있다고 사료된다. 본 연구에 사용된 두께 0.3 mm 의 PET 필름에서는 이 값이 207mm 로 설정 되었는데 이 값은 절연재의 두께와 종류에 따라 달라질 것이므로 사안별로 연구 되어야 할 것이다.

3.3. PET 의 유전 특성시험

그림 5 와 그림 6, 그림 7에는 PET 필름의 FC 함침에 의한 물성변화를 보기 위하여 50 °C, 90 °C, 110 °C 에서 각각 480 시간 함침시킨 재료의 유전율을 조사한 것이다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 유전율의 온도에 의한 변화는 발생하지 않고 전압에 따라 약 600 V 정도까지는 일정한 값을 유지하다가 급격하게 상승하는 양상을 나타낸다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 SF₆ + FC 의 혼합 가스는 변압기의 일반적인 구조 재료의 특성에 영향을 미치지 않는 것으로 밝혀지고 있으며 특히 가스 변압기의 주 절연재료인 PET 필름은 SF₆+FC의 혼합 절연 변

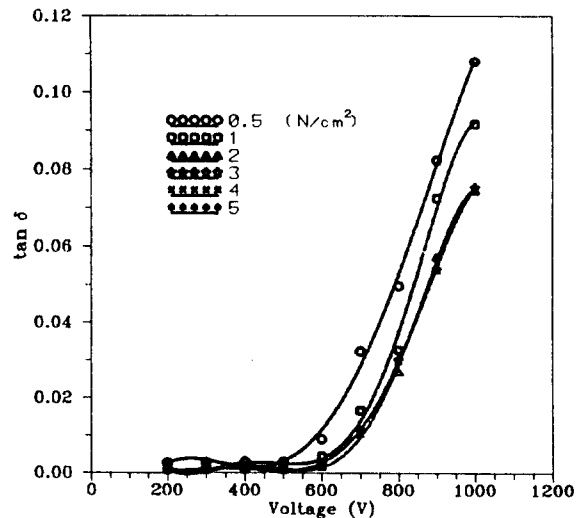


그림 5. PET 필름의 tan δ 의 전압, 압력 의존성 (temp. 50°C, pressure 0.5-5 N/cm²)

Fig. 5. The tan δ characteristics of PET film depending on voltage and pressures (temp. 50°C, pressure 0.5-5 N/cm²)

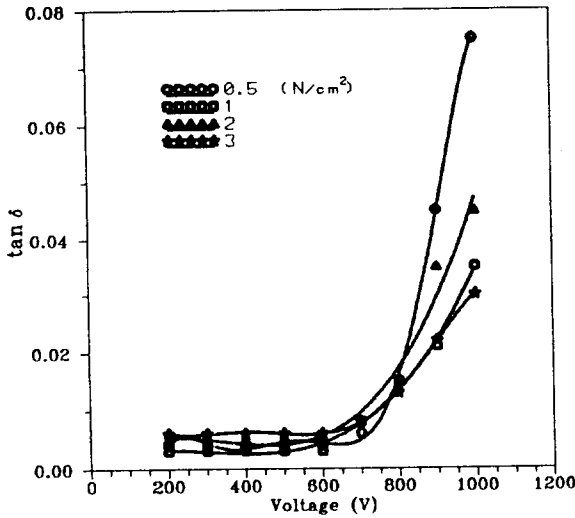


그림 6. PET 필름의 $\tan \delta$ 의 전압, 압력 의존성 (temp. 90°C, pressure 0.5-3 N/cm²)

Fig. 6. The $\tan \delta$ characteristics of PET film depending on voltage and pressures (temp. 90°C, pressure 0.5-3 N/cm²)

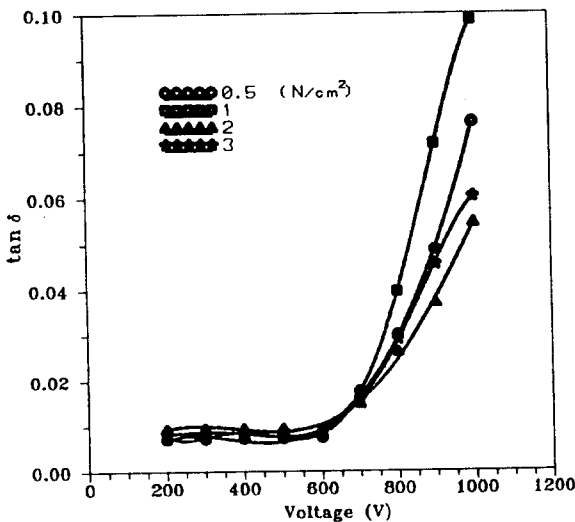


그림 7. PET 필름의 $\tan \delta$ 의 전압, 압력 의존성 (temp. 110°C, pressure 0.5-3 N/cm²)

Fig. 7. The $\tan \delta$ characteristics of PET film depending on voltage and pressures (temp. 110°C, pressure 0.5-5 N/cm²)

압기의 주 절연 재료로서 상당히 고온의 영역까지 양호한 특성을 나타내는 것으로 평가 할 수 있다.

4. 결 론

대용량 증발냉각식 변압기 개발을 위하여 냉각 물질인 FC 와 SF₆ 가스의 혼합 특성을 연구하여 다음과 같은 유용한 결론을 얻었다.

. FC 가스는 상압에서 약 50 °C 에서 증발을 함으로서 기존의 가스 변압기 설계기준은 적용될 수 없고 기계적으로는 고압 용기의 설계에 근거해야 함을 확인하였고 전기적으로는 혼합 가스의 압력과 절연내력의 관계를 규명하여 설계 자료를 제시 하였다.

. 가스 변압기에 사용되는 구조 절연재의 FC+ SF₆ 가스 함침 특성을 조사하였으며 주절연재인 PET 필름의 함침후의 유전을 변화를 조사하여 가스 변압기의 주절연재로서의 적합성을 확인하였다.

실권선에서의 PET 필름의 절연특성을 연구하기 위하여 시험용 권선기를 제작 시험한 결과 절연내력에 미치는 가스압 및 권선의 곡률, taping 시의 장력 등의 관계를 규명하여 실 제작에 응용되도록 하였다.

※ 본 연구는 1994 년도 한국전력공사의 지원에 의하여 일부 수행 되었음.

참 고 문 헌

1. K.GOTO,T.YAMAZAKI "STUDIES ON STRUCTURAL INTEGRITY FOR SEPARATE-COOLING /SHEET-WINDING GAS INSULATED TRANSFORMER" IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, VOL.4,NO.2, APRIL, PP 1079-1085 ,1989
2. HEINZ JASTER AND PHILIP G.GOSKY "SOLUBILITY OF SULFUR HEXAFLUORIDE IN FLUOROCARBON LIQUIDS" J. OF CHEMICAL AND ENGINEERING DATA, VOL.21,NO.1, PP. 66-71 ,1976
3. R.H HOLLISTER " GAS VAPER AND FIRE RESISTANT TRANSFORMERS" CH1510-7/79, PP. 239-242,1979
4. JOHN R .MORIES, SANBORN F. PHILIP "A NEW CONCEPT FOR A COMPRESSED GAS-INSULATED POWER TRANSFORMER" 7 TH IEEE/PES TRSNS.AND

DISTR. CONFERENCE AND EXPOSITION, APRIL 1-6 PP 176-183, 1979

5. K.GOTO, 외5 "DEVELOPMENT OF INSULATION TECHNOLOGY FOR HIGH-

VOLTAGE GAS-INSULATED TRANSFORMER "IEEE TRANS. ON PD, VOL. 4, NO. 2, PP 1096-2004, 1989

6. 전영수 "GAS 절연 변압기의 소개" 전기학회지 VOL 41, NO 4, PP 27-34 1992

저자소개



허창수

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대학교 대학원 졸업(석사). 19987년 인하대학교 대학원 (공학). 1988-1993년 한국전기연구소 기능재료연구실 실장. 1996년 현재 인하대학교 공대 조교수.



이계복

1962년 8월 17일생. 1985년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 2월-현재 한국전기연구소 전기전자환경연구팀 선임연구원. 인하대학교 전기공학과 박사과정.