

## 가열조건이 폴리아미드지의 절연특성에 미치는 영향

선종호, 김우성, 김광화  
한국전기연구소

### A Study on the heating conditions effect on the insulation characteristics of polyamid papers

J. H. Sun, W. S. Kim, K. H. Kim  
KERI

**Abstract** - In this study, we describe comparison of insulation characteristics of polyamid papers with heating conditions. The partial discharge behavior until breakdown and breakdown strength for thermal degradation films are observed in SF<sub>6</sub> gas chamber. The four layered NOMEX films of thickness of 50 $\mu$ m were used as solid insulation films and the sphere of which diameter is 40mm to sphere electrode system was used and each insulation films were inserted between sphere electrodes. The used gas pressure was 1.0bar and used temperature was each of 250 $^{\circ}$ C, 270 $^{\circ}$ C, 300 $^{\circ}$ C, 320 $^{\circ}$ C, 350 $^{\circ}$ C and the voltage were applied until breakdown films.

#### 1. 서 론

도심지역의 전력집중 현상이 계속 증가되고, 이에 따라 도심부에 옥내변전소나 지하변전소의 건설도 증가되고 있다. 도심부의 변전소 건설은 부지확보의 어려움 때문에 전력기기의 콤팩트화가 필요하며, 기기가 옥내에 설치되기 때문에 방재성능을 고려해야 하는데 이러한 방재의 목적으로 사용빈도가 증대되고 있는 것이 가스절연변압기이다.

변압기는 부하율 혹은 냉각특성 등에 따라 온도특성이 다른 경향을 나타내는데, 가스절연변압기의 냉각 및 절연매체로서 사용되고 있는 SF<sub>6</sub>가스는 광유와 같은 액상 절연체보다 밀도와 비열이 낮기 때문에 동일유속에서의 열전달율비는 광유에 비하여 매우 떨어진다. 그러므로 냉각특성을 좋게 하기 위해서는 가스압력을 높이는 한편 유속을 크게 해야 하지만 유속이 커지면 냉각매체의 편류로 인하여 국부과열이 일어날 가능성이 있다[1]-[2].

이러한 냉각특성 때문에 가스절연변압기에서는 유입식 변압기에서 사용되고 있는 크래프트지에 비하여 내열특성이 우수한 절연체를 사용하고 있다.

가스절연변압기는 지지 절연재료로서 유입식변압기에서 많이 사용되고 있는 프레스보드와 코일절연으로는 PET필름이나 폴리아라미드계 절연지가 사용되고 있다. SF<sub>6</sub>가스는 물리적 화학적으로 안정되어 있기 때문에 가스절연변압기의 열적수명은 주로 이러한 고체절연체의 열적인 수명에 크게 의존하는 것으로 보고되고 있다[3].

그러므로 본 연구에서는 가스절연변압기의 코일절연으로 많이 사용되고 있는 폴리아라미드계 절연필름을 사용하여 열열화에 따른 전기적 특성을 고찰하였다. 시료로서는 두께 50 $\mu$ m의 NOMEX T-410을 사용하였으며, 여러 가지 온도와 함께 열화시간을 변화시켜 가면서 열열화시켰다. 열열화된 시료를 1.0bar 압력의 SF<sub>6</sub>가스 분위기속에서 부분방전 개시전압 및 인가전압에 따른 부분방전 변화특성, 교류과파전압특성을 구하였다.

#### 2. 가스절연변압기의 온도상승(4)

본 연구의 시료로서 사용되고 있는 폴리아라미드계 절연지의 열적인 특성 및 가스절연변압기의 발열원인을 간략히 설명하면 다음과 같다.

##### 2.1 가스절연변압기의 온도상승특성

가스절연변압기의 열적수명은 고체절연체의 열적인 수명에 크게 의존하는 것으로 보고되고 있다. IEC 905에 의하면 폴리아라미드지의 온도등급을 H종이라고 했을 때 정격부하에서 권선의 최고점온도는 175 $^{\circ}$ C, 허용가능한 권선의 최고점온도는 220 $^{\circ}$ C, 정격부하에서 평균권선 온도상승은 125 $^{\circ}$ C로 규정되어 있다[5]. 그러나 일반적으로 변압기에 이상이 발생하면 허용온도이상으로 국부적인 온도상승이 일어날 수 있다. 국부적인 온도상승 원인으로 과열, 부분방전, 아크방전, 순환전류 등이 있지만 특히 가스절연변압기에서 냉매로 사용되는 SF<sub>6</sub>가스는 광유와 같은 액상 절연체보다 밀도와 비열이 낮기 때문에 대기압에서 열전도도가 광유에 비하여 10배정도 낮다. 그러므로 냉각특성을 좋게 하기 위해서는 가스압력을 높이는 한편 유속을 크게 해야 하지만 유속이 커지면 냉각매체의 편류로 인하여 국부과열이 일어날 가능성이 있다[1]-[2].

##### 2.2 아라미드지의 열적특성

아라미드지는 아라미드폴리머의 단섬유와 소결합 분자로 되어 있으며, 기계적강도는 셀룰로오스계 절연지보다 우수하며, 또한 상대습도 95%까지 거의 변화가 없고, 또한 아라미드지는 225 $^{\circ}$ C까지는 실온에서의 절연내력을 유지하며, 250 $^{\circ}$ C에서 초기 절연내력의 95%이상을 유지하는 것으로 알려져 있어 H중 절연물로서 사용되고 있다.

#### 3. 실험

##### 3.1 시료 및 전극

사용된 시료는 폴리아라미드 절연지 계열인 두께 50 $\mu$ m의 NOMEX T-410 절연필름이다. 실제 가스절연변압기의 도체에는 얇은 절연필름이 여러 장 겹쳐져 있기 때문에 본 연구에서도 절연필름을 직경 100mm의 크기로 일련된 후 절연필름을 4장 겹쳐 전체 두께 200 $\mu$ m의 시료를 하나의 시료로 사용하였다. 이 시료를 일반적인 전기기를 이용하여 250 $^{\circ}$ C, 270 $^{\circ}$ C, 300 $^{\circ}$ C, 320 $^{\circ}$ C, 350 $^{\circ}$ C의 여러 가지 온도에서 인위적으로 48시간, 96시간, 168시간동안 열열화를 일으킨 후 시료로 사용하였다.

전극으로는 그림 1과 같이 직경 40mm의 구전극을 사용하였으며, 그림에서 나타나있지 않지만 고압부에 전극간 거리를 조절할 수 있는 마이크로메타가 설치되어 있다. 시료삽입방법은 상하부 구전극이 접촉되었을 때 마이크로

메타를 읽은 후 두께 200 $\mu\text{m}$ 의 시료를 삽입하고 다시 마이크로메타로서 초기치에 180 $\mu\text{m}$ 를 더한 값으로 조정하여 전극사이의 시료두께는 압력을 가하여 180 $\mu\text{m}$ 로 하였으며 이는 전극과 시료가 접한 부분의 기중부를 없애기 위해서이다.

이와 같이 시료가 삽입된 전극시스템은 아크릴로 제작된 gas chamber 내부에 설치하여 충분히 진공 탈기한 후 chamber 내부의 SF<sub>6</sub> 가스압력을 1.0bar로 유지한 후 실험하였다.

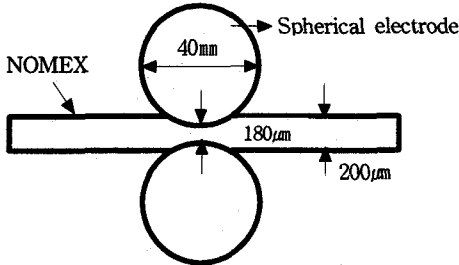


그림 1. 구전극의 구조

### 3.2 실험회로 및 방법

#### 3.2.1 실험회로

그림 2는 본 연구에서 사용된 실험회로를 보여주고 있다. 그림 2에서 시료를 제외한 시험용 변압기, 커플링 커패시터, 고압 인가선 등은 50kV까지 부분방전이 발생하지 않으며, 잡음 레벨은 1pC 이하이다. 전압은 정확도를 높이기 위하여 시험용 변압기의 제3권선에 연결된 Multimeter로 전압을 확인한 후 변압비를 적용하여 전압 크기를 구하였으며, 부분방전측정기로서 부분방전크기 및 발생을 확인하였다.

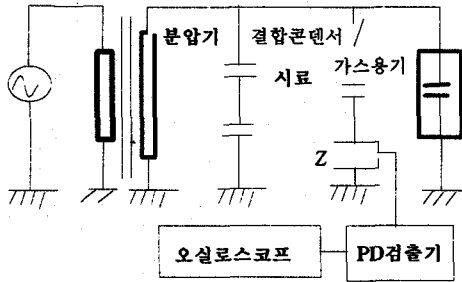


그림 2. 부분방전 측정회로

#### 3.2.2 실험방법

일반적으로 절연시스템에 전압을 인가하여 파괴시험을 실시하는 경우 인가전압의 파형, 인가시간, 인가방법 등에 따라 결과가 달라진다. 따라서 유효한 시험결과를 얻기 위해서는 국제적으로 인정되는 표준규격에 따른 조건을 준수할 필요가 있다. 이러한 시험규격으로서 ANSI/IEEE std 434와 ASTM D149-97a가 있다. 본 실험에서는 ASTM D149-97a를 적용하여 절연파괴시험을 실시하였다. ASTM D149-97a에서는 절연시스템에 전압을 인가할 때 두가지 단계의 방법을 이용하여 절연시스템에 전압을 인가하여 정확한 절연파괴전압을 측정하는 것으로 되어있다. 그 방법으로 먼저 시료에 연속적으로 전압을 상승시키면서 시료의 절연이 파괴될 때까지 short-time-test를 실시하여 대략적인 파괴 전압을 확인한 후, 두 번째 단계인 step-by-step법에서는 short-time-test에서 구한 개략적인 전압의 50%를 start step voltage로 설정한 후 그 starting voltage

의 10%에 해당하는 전압을 step전압으로 설정하여 절연시스템에 인가하였다.

ASTM D149-97a에 의하면 전압인가시간은  $(60 \pm 5)$ s로 되어있으며 본 실험에서는 60s로 하였다. 그림 3은 ASTM D149-97a step-by-step에 따른 전압인가방법을 도식적으로 나타내었다.

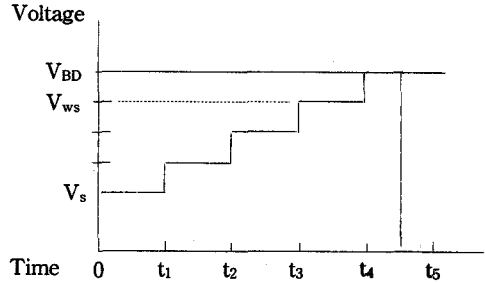


그림 3. Step-by-Step 시험의 전압 모식도

또 부분방전측정방법은 그림 2와 같은 실험회로를 사용하여 1.0bar의 압력에서 각각의 온도조건과 열화시간에 따라 열화시킨 NOMEX T-410에 Step-by-step법에 의거하여 시료가 절연파괴 될 때까지 교류전압을 연속적으로 상승시키면서 인가전압 상승 중 부분방전 개시전압과 파괴전압을 구하였고, 인가전압에 대한 결보기 부분방전의 최대크기 변화특성을 관찰하였다. 시험횟수는 하나의 시료에 대해서 3회 실시하였다.

### 4. 실험결과

앞 항에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 폴리아라미드지 절연지의 열화화에 따른 절연파괴전압특성과 부분방전 개시전압특성, 부분방전량 증가특성을 분석하였다. 그림 4는 Step-by-Step 전압인가방식에 의한 가열온도와 가열시간에 따른 절연파괴전압특성을 보이고 있다. 그림 4에서와 같이 48시간 가열한 시료의 절연파괴전압은 270 $^{\circ}\text{C}$ 까지는 거의 절연파괴전압의 변화가 없으나 300 $^{\circ}\text{C}$ 부터 절연파괴전압이 떨어지기 시작하여 350 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 절연파괴전압의 저하가 급격해 짐을 알 수 있다.

동일한 온도에서의 절연파괴전압은 시료의 열화시간에 길어질수록 절연파괴전압이 저하되는 것을 알 수 있었다. 이러한 것은 NONEX지가 고온에서 섬유조직의 파괴로 인하여 절연성능이 저하되기 때문인 것으로 사료된다.

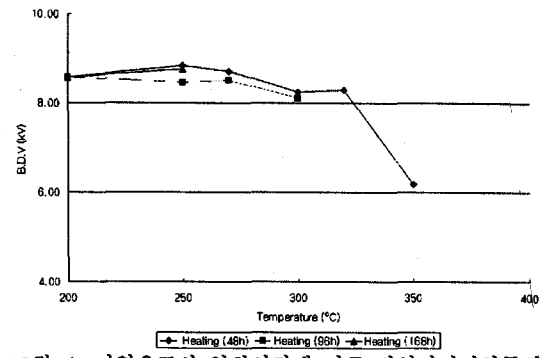


그림 4. 가열온도와 열화시간에 따른 절연파괴전압특성

그림 5는 부분방전 개시전압과 단순절연파괴시험전압의 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 부분방전 개시전압은 가열온도와 열화시간에 상관없이 거의 비슷한 경향

을 보이는 것을 알 수 있었으며, 단순절연파괴전압은 Step-by-Step 전압인가방식에 비하여 같은 온도에서 약간 높은 절연파괴치를 보이고 있으며, Step-by-Step 전압인가방식에 의한 절연파괴전압결과와 마찬가지로 300℃부터 파괴전압이 저하하고 있음을 알 수 있으며, 열화시간이 증가할수록 절연파괴전압이 저하되는 것을 알 수 있었다. 실제 부분방전개시전압은 본 연구에서 사용된 전극구조에서 구전극과 폴리아라미드 절연지 사이에 존재하는 미소가스갭의 방전 개시에 의해서 결정되며, 부분방전 개시전압은 SF<sub>6</sub> 가스압력과 폴리아라미드지의 유전율에 주로 의존할 것이므로 본 연구에서와 같이 SF<sub>6</sub> 가스압력은 1.0bar로 일정하고 폴리아라미드지를 열열화 시켰을 때의 유전율과 초기상태의 유전율이 변화가 없으므로 부분방전개시전압의 변화가 없는 것으로 사료된다.

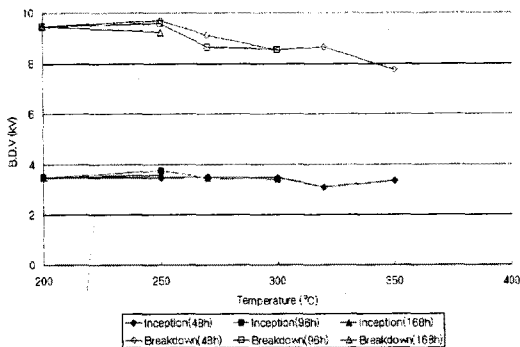


그림 5. 온도와 열화시간에 따른 부분방전 개시전압 및 단순파괴전압

그림 6과 그림 7은 열화시간과 인가전압크기에 따른 부분방전량의 변화특성을 나타내었다. 여기에서 그림 6은 250℃의 온도에서 열화시간을 변화시켰을 때 인가전압크기에 따른 부분방전량의 변화특성을 관찰한 것이며 그림 7은 그외의 온도에서 열화시간에 따른 부분방전량의 변화특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 단시간 파괴에서는 같은 인가전압에서 가열온도와 열화시간에 따른 부분방전량의 크기는 차가 거의 없으며, 단지 인가전압이 증가할수록 부분방전량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다.

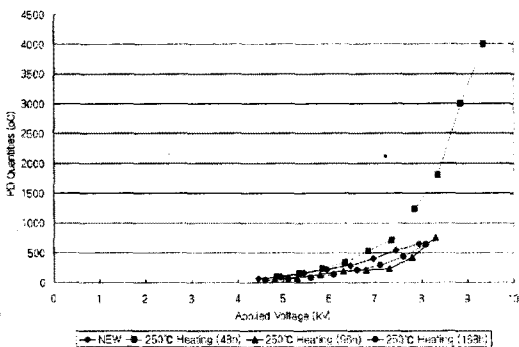


그림 6. 열화시간과 인가전압크기에 따른 부분방전량 변화특성

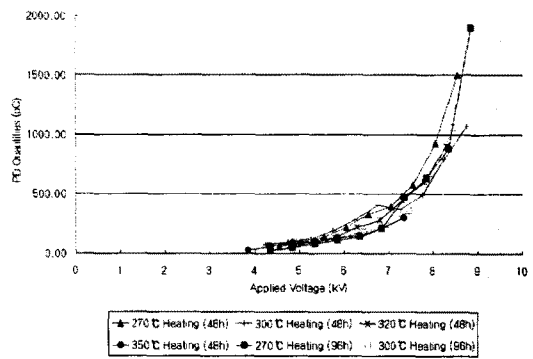


그림 7. 인가전압크기에 따른 부분방전량의 변화특성

## 5. 결 론

미소가스갭 전극구조에서 폴리아라미드지의 열열화에 따른 교류절연파괴전압과 부분방전실험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 동일한 열열화시간에서 가열온도 300℃부터 절연파괴전압은 감소하기 시작하였으며, 350℃에서 급격한 감소경향을 보였다.
2. 같은 열화온도에서 열화시간이 길어지면 절연파괴전압이 감소하는 경향을 보였다.
3. 부분방전개시전압이나 인가전압에 따른 부분방전량은 가열온도와 열화시간에 따라 큰 변화를 보이지 않았다.

본 연구에서는 향후 다양한 가열조건의 변화 및 열열화된 폴리아라미드지의 기계적 특성실험을 통하여 열열화에 따른 폴리아라미드 절연지의 절연성능 변화에 관하여 고찰할 예정이다.

## (참 고 문 헌)

- [1] "가스絶緣變壓器の保守管理", 日本電氣協同研究, 第54券 第5号, 1999. 2
- [2] 坂原 健, "SF<sub>6</sub>가스絶緣變壓器券線の冷却特性の檢討", 電氣學會全國大會, No. 1197, 1996
- [3] Katsutoshi et al., "Thermal Degradation of Insulating Materials of SF<sub>6</sub> Gas Insulated Transformers", T. IEE Japan, Vol. 115-B, No. 4, '95
- [4] 日本電氣學會, "不燃性, 難燃性變壓器の現狀とその動向", 電氣學會技術報告 第459号, pp. 30-60, 1993. 4
- [5] IEC 905, "Loading guide for dry-type power transformer". 1987
- [6] ASTM D149-97a, "Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating at Commercial Power Frequencies", 1997