

논문 20-3-15

폴리머 피뢰기의 구조에 따른 온도와 누설전류 특성

Temperature and Leakage Current Characteristics of Polymeric Surge Arrester with Housing

조한구^{1,a}, 유대훈¹, 이운용¹, 김하나¹

(Han-Goo Cho^{1,a}, Dae-Hoon You¹, Un-Yong Lee¹, and Ha-Na Kim¹)

Abstract

In this paper, the ZnO surge arrester performance of power distribution class has been studied under different manufacturing conditions such as housing materials(polymeric, porcelain), interface sealants and one-body molding type. In the recent years, the polymeric ZnO surge arresters have been developed and put into operations based on their excellent characteristics. For polymeric surge arresters, the inner gas volume is extremely small, especially in solid insulation polymeric arresters there are not any gas volume inside arresters in the structure due to polymeric materials are filled into the internal gas volume. The sealing integrity is related to safe operation of surge arrester, the prime failure reason of porcelain housed arresters is moisture ingress. In this paper, the sealing integrity of polymeric surge arresters is investigated with moisture multi-aging test and ingress test. The evaluation techniques are used to inspect the sealing integrity of polymeric arresters, including leakage current, surface temperature, reference voltage and dissipation factor.

Key Words : Surge arrester, Polymeric, FRP module, Leakage current, Reference voltage, Sealing integrity

1. 서론

전력계통에서 낙뢰 및 이상 과전압으로부터 선로 및 전력기기를 보호하기 위해 사용되고 있는 피뢰기는 오랫동안의 많은 연구로 그 성능 및 경제성 측면에서 많은 발전을 이룩하여 낙뢰사고는 과거에 비해 현저하게 줄어들고 있는 실정이다[1-3]. 현재 사용되고 있는 피뢰기는 산화아연소자를 적용하고 있으며, 하우스 재질에 따라 자기 및 폴리머 피뢰기로 구분할 수 있다. 특히, 폴리머 피뢰기는 자기 피뢰기의 폭발 및 비산 특성과 수분침투에 의한 열화 등의 단점을 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 세계 각국에서 이루어지고 있는 다양한 성능평가실험을 통해 그 성능을 확인하고 있어 수

가 날로 증대되고 있다.

22.9 kV 배전선로에 사용되고 있는 정격전압 18 kV 폴리머 피뢰기의 경우 국내외 제조사별로 피뢰기 제조방식에 차이가 있으며, 이러한 구조적 차이는 방압 및 기밀성능을 향상시키기 위한 목적으로 발전하여 왔다.

한편 최근 배전용 폴리머 피뢰기의 가속열화실험에 대한 연구동향은 국제규격인 IEC 60099-4 등의 피뢰기 실험과 더불어 IEC 61109를 기초로 한 염수분무, 복합환경열화, 경년변화 및 냉열실험 등을 통해 피뢰기 내·외부의 열화 특성을 보다 다양한 진단기술을 통해 평가하고 있다. 이러한 실험에 사용되는 피뢰기들은 제작 업체별로 다양한 형태로 제작된 시료들로서 구조적 차이에 따른 다양한 열화양상을 나타내고 있다[4-7].

한편 피뢰기는 상시 인가전압으로 과전되어 있어 피뢰기를 통해 낮은 누설전류가 흐르게 된다. 이러한 피뢰기가 설치된 선로에 뇌격이 침입하거나 선로사고 등에 의해 과전압이 발생한 경우 피

1. 한국전기연구원

(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr

접수일자 : 2006. 9. 25

1차 심사 : 2007. 2. 7

심사완료 : 2007. 2. 23

뢰기는 선로에 발생한 이상전압을 흡수하게 되고, 이로 인해 피뢰기 소자는 온도가 상승하게 된다. 이처럼 온도가 상승하게 되면, 선로가 정상상태로 돌아온 후에도 피뢰기의 누설전류는 과전압 발생 전보다 높게 된다. 시간이 경과함에 따라 피뢰기 소자의 온도는 정상상태로 돌아오고, 누설전류도 감소하게 되지만, 피뢰기의 장기 수명을 향상시키기 위해서는 피뢰기가 이상전압에 의해 상승된 온도를 빨리 회복할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 복합열화실험 및 온도특성 실험을 통해 폴리머 피뢰기의 구조에 따른 특성변화를 관찰하여 피뢰기의 장기 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1 폴리머 피뢰기의 제작

폴리머 피뢰기의 상부 및 하부전극 사이에 ZnO 바리스터 소자 및 변위 완화용 corn disk 등을 정렬시킨 후, 필라멘트 와인딩(filament winding) 방식에 의해 피뢰기 모듈(module)을 제작하였다. 이와 같이 제작된 피뢰기 모듈은 표 1과 같은 방법으로, 삽입형의 경우 피뢰기 모듈 삽입시 계면에 실란인 그리이스의 처리 유·무에 따라 건식 및 습식으로 구분하였고, 시료 3은 피뢰기 모듈에 실리콘 고무를 직접 사출한 일체형이다. 또한 자기 피뢰기는 폴리머 피뢰기와의 비교를 위해 준비되었다. 삽입형 시료의 경우 누설거리와 전장이 각각 665 mm 및 247 mm이며, 일체형은 718 mm 및 274 mm로 일체형이 누설거리 및 전장이 조금 긴 것으로 나타났다.

2.2 폴리머 피뢰기의 복합열화실험

복합열화실험을 위한 챔버는 10 m³(2×2×2.5)의 크기로 내부는 스테인레스 강판으로 제작되었으며, 50 kVA, 25 kV를 인가할 수 있는 변압기를 통해 각 시료에 18 kV 배전용 피뢰기의 최대연속운전전압인 15.3 kV를 인가하였다. 실험 사이클은 복합환경을 고려한 IEC 61109 Annex C의 사이클을 기본으로 하여 강우, 건조, 염무, 습도, 전압인가 등의 열화 파라미터들을 설정하였다. 강우의 경우는 여름철의 장마를 고려하여 Annex C보다 3시간을 연장하였고, 건조의 경우는 70 ℃로 20 ℃ 정도를 높였다. 또한 염수 분무는 Annex C에서 권장하는 16000 μS/cm 보다 도전율을 낮추어 4000 μS/cm로 하였다. 1일 24시간으로 구성된 복합열화실험 사이클을 그림 1에 나타내었다.

표 1. 피뢰기 제작방법.

Table 1. Manufacturing methods of arresters.

시료	하우징 재료	제작방법	비고
Arrester 1	폴리머	삽입형	건식
Arrester 2	폴리머	삽입형	습식
Arrester 3	폴리머	일체형	진공사출
Arrester 4	자기	애관형	

Rain								
Dry(70℃)								
Salt fog								
Humidity								
Power								
시간	2.5 hrs	4.0 hrs	3.0 hrs	2.5 hrs	4.0 hrs	3.0 hrs	4.0 hrs	1.0 hrs

그림 1. 복합열화실험 사이클.

Fig. 1. Cycle of multi-ageing test.

또한 복합열화실험은 폴리머 피뢰기에 한해 시행하였으며, 실험 전·후 및 중간에 AC 누설전류와 동작개시전압을 측정하여 피뢰기의 열화 상태를 확인하였다.

2.3 피뢰기의 온도 및 누설전류 실험

폴리머 피뢰기 및 자기 피뢰기의 온도에 따른 누설전류의 변화를 측정하기 위해 300 ℃까지 승온 가능한 항온조내에 피뢰기를 위치시키고, 상온에서 120 ℃사이를 20 ℃ 간격으로 각각의 온도에서 누설전류를 측정하였다. 이 때 AC 고전압 인가 장치로 최대 연속 운전 전압을 인가하여 이 때의 전류를 AC 전류 detector를 사용하여 피뢰기의 전체 누설전류를 관찰하였다. 또한 피뢰기의 발열 및 온도 특성을 조사하기 위해 각각의 피뢰기를 120 ℃의 항온조에서 2시간 유지시킨 후, 피뢰기를 대기 중에 위치시켜서 최대 연속 운전 전압하에서 시간에 따른 누설전류의 변화와 표면온도의 변화를 각각 조사하였다.

2.4 피뢰기의 수분침투실험

피뢰기의 수분침투실험은 IEC 60099-4에 제시된 thermo-mechanical 실험에 따라 시행하였다. 실험은 복합열화실험과 동일한 크기의 챔버로 상온에서 70 ℃의 온도범위에서 실시하였다.

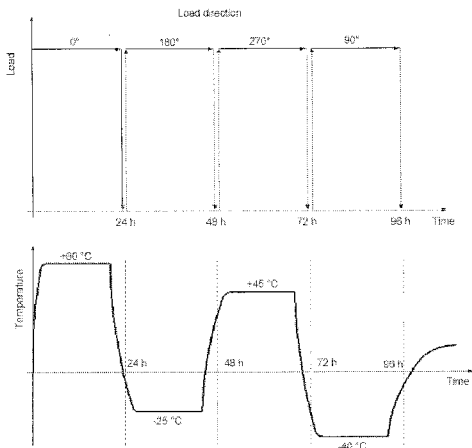


그림 2. 수분침투시험의 부하 및 온도 사이클.
 Fig. 2. Cantilever load and temperature cycle of thermo-mechanical test.

부하의 방향은 0°, 180°, 270°, 및 90°도의 4 방향으로 1 사이클을 2시간으로 하였다. 그리고 시료에 인가되는 기계적인 하중은 배전용 폴리머 피뢰기의 절연행거의 외팔보 강도인 100 kgf로 하였다. 습도는 통상적인 여름주기 40~80 %의 범위인 50 %의 습도로 내부 환경을 유지하였으며, 그림 2에 수분침투시험의 부하 및 온도 사이클을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

폴리머 피뢰기 시료 1-3의 복합열화시험 동안의 AC 전체 누설전류의 변화를 그림 3에 나타내었다. 누설전류는 Labview를 이용한 피뢰기 누설전류 프로그램을 사용하여 측정하였으며, 최대 연속운전전압에서의 각 시료들에 흐르는 실효치 누설전류는 190~230 μ A 범위였다. 피뢰기 구조에 따른 복합열화시험 동안 누설전류 변화는 없었으며, 1000시간이 완료된 상황에서도 시료 피뢰기들의 열화를 발견할 수 없었다. 한편 그림 4에 나타난 복합열화시험 동안의 동작개시전압의 변화에서도 누설전류 변화와 마찬가지로 구조에 따른 변화는 물론 시험 전 및 후의 열화현상 또한 관찰되지 않았다. 일반적으로 피뢰기의 복합열화시험 및 수분 침투 시험을 평가하기 위해서는 AC 및 DC 누설전류, PD 측정 또는 3 고조파 전류의 측정 등을 많이 사용하고 있으나, AC 및 DC 누설전류의 사용이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다. 한편 연구에 따라

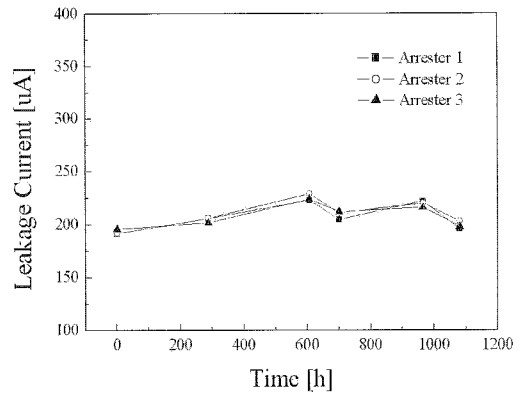


그림 3. 복합열화시험 동안 누설전류 변화.
 Fig. 3. Variation of leakage current during tests.

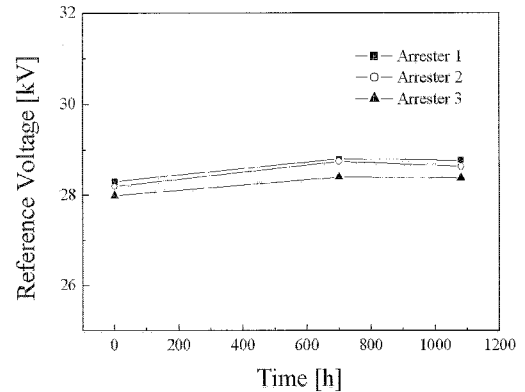


그림 4. 복합열화 시험 동안의 동작개시전압변화.
 Fig. 4. Variation of reference voltage during tests.

면 복합열화시험에 사용된 피뢰기 가운데 일체형 피뢰기가 특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 내부에 공기층의 분포가 적을수록 특성이 뛰어난 것으로 보고되고 있다.

현재 국내외에서 가장 많이 적용되고 있는 피뢰기 국제 규격인 IEC 60099-4에서는 폴리머 피뢰기에 대한 복합열화시험을 채용하고 있지는 않지만, 최근의 연구 동향을 살펴보면 폴리머 현수여자의 규격인 IEC 61109를 바탕으로 피뢰기의 복합열화 특성을 조사하는 것이 일반적으로 되어 있다. 향후 폴리머 절연물에서 적용중인 복합열화시험이 피뢰기에 적용될 것으로 예측되며, 보다 다양한 방법을 통해 피뢰기의 열화 특성을 조사해야 할 것으로 생각된다.

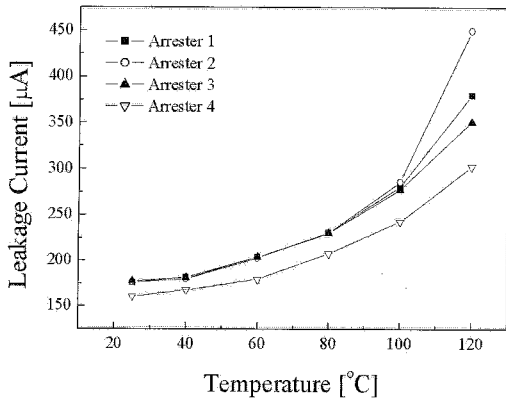


그림 5. 온도에 따른 누설전류 특성.
Fig. 5. Leakage current with temperature.

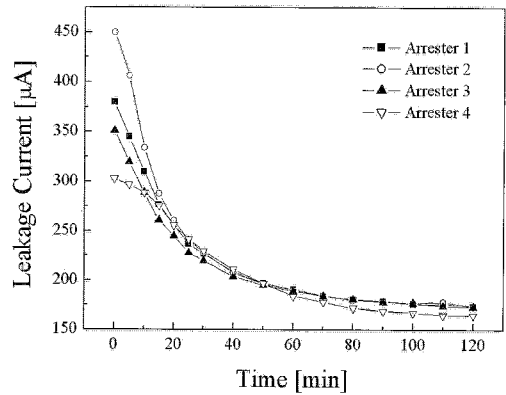


그림 6. 시간에 따른 누설전류 변화.
Fig. 6. Variation of leakage current with time.

한편 복합열화실험이 완료된 피뢰기들은 실내 온도 조건에서 장기간의 휴지시간(3개월 이상)을 가졌으며, 그 이후 피뢰기 구조에 따른 온도 특성을 조사하기 위해 자기 피뢰기와 함께 온도 특성 실험을 시행하였다.

피뢰기의 연속운전전압에 대한 각각의 온도에서 시료 1~4의 전체 누설전류를 그림 5에 나타내었다. 그림과 같이 시료 1~3의 폴리머 피뢰기들은 같은 제조사의 ZnO 바리스터 소자를 채용함으로써 100 °C까지는 거의 비슷한 누설전류를 나타낼 수 있으며, 자기제 피뢰기인 시료 4는 폴리머 피뢰기에 사용된 ZnO 바리스터 소자에 비해 누설전류가 적은 것을 알 수 있었다. 이는 각 제조사마다 ZnO 바리스터 소자의 전기적 특성에 의존하는 것으로 피뢰기의 특성과는 무관하며, 상온에서 피뢰기의 최대연속 운전전압에서의 누설전류는 각각 176, 177, 178 및 161 μA로 나타났다.

한편 시료 1~3은 120 °C에서 현저한 누설전류의 차이를 나타내었는데, 습식 삽입형이 가장 크고, 건식 및 일체형의 순으로 누설전류가 감소하는 현상을 나타내었다. ZnO 바리스터 소자 및 모든 부품들이 동일한 조건에서, 피뢰기 모듈과 실리콘 하우징간의 계면 특성에 차이가 있는 것을 고려하였을 때, 각 피뢰기의 온도가 상승함에 따라 계면의 구조적 특성에 따라 온도의 발열 및 흡열 상태가 서로 상이한 것으로 판단되었다. 특히 폴리머 피뢰기들은 100 °C에서는 모두 280 μA 정도의 비슷한 누설전류 값을 나타내었고, 120 °C에서 시료 1~3의 누설전류가 각각 380, 450 및 351 μA로, 특히 습식 삽입형 피뢰기의 누설전류가 크게 증가한

현상으로 볼 때 피뢰기 하우징의 누설거리와 전장의 영향은 극히 적은 것으로 생각되었다. 한편 복합열화실험에 관한 많은 논문에서도 일체형 피뢰기의 우수성을 강조하고 있으며, 발변전소용 및 송전선로용 피뢰기의 경우 현재 대부분의 제조사가 직접 사출 방식을 사용한 일체형 구조를 채택하고 있음을 생각해 볼 때 배전용 피뢰기에서도 일체형으로 제작하는 경우 기밀 및 흡습 특성 뿐만 아니라 온도 특성에서도 그 성능이 뛰어날 것으로 사료되었다.

그림 6은 피뢰기의 시간에 따른 누설전류 변화를 나타낸 것으로, 시료 1~3의 경우 초기 120 °C에서의 시료 간의 누설전류 차가 100 μA 정도로 그림 6에서와 같이 그래프들이 넓게 퍼져 있으나, 40분 정도의 시간이 경과한 후에는 그 차이가 5 μA 정도로 거의 비슷한 값을 나타내었다. 이는 폴리머 피뢰기 시료들의 열발산율이 비슷하며, 임계온도 이하에서는 동일한 누설전류 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 그러나 자기 피뢰기인 시료 4는 초기의 낮은 누설전류에도 불구하고, 40분까지는 그래프의 기울기가 폴리머 피뢰기의 경우보다 완만하여 ZnO 바리스터 소자의 상승된 열을 충분히 외부로 방출하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 자기 피뢰기 내부에 존재하는 공기층에 의한 것으로, 폴리머 피뢰기와 같은 ZnO 바리스터 소자를 사용한다면 누설전류가 정상상태에 이르기까지 더 많은 시간이 요구될 것으로 생각되었다. 또한 모든 시료들은 2시간 이내에 거의 정상온도로 회복하여 정상상태에서의 누설전류 값을 나타내었다.

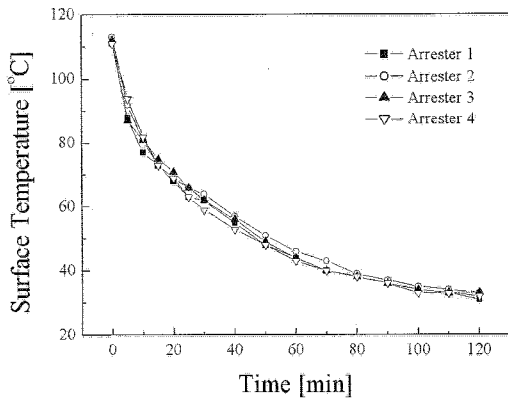


그림 7. 피뢰기 표면 온도 변화.
Fig. 7. Variation of surface temperature of arresters.

그림 7의 시간에 따른 피뢰기의 표면온도 변화 곡선에서는 피뢰기 구조에 관계없이 모든 피뢰기가 거의 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이처럼 모든 시료의 표면온도 변화가 거의 일치하는 것은 비접촉식 적외선 온도계를 사용함으로써 측정상의 오차가 발생한 것으로 생각되었다. 따라서 측정된 값이 실제의 피뢰기 표면 온도라기보다는 피뢰기 표면 부근의 대기온도에 더 많은 영향을 받은 것으로 생각되며, 정확한 실험을 위해서는 피뢰기 하우징 표면에 온도 센서를 부착하거나, 하우징내의 ZnO 바리스터 소자에 온도 센서를 부착함으로써 내부 온도의 특성을 조사하는 것이 바람직할 것으로 사료되었다. 본 연구에서는 피뢰기 표면 온도는 폴리머형이나 자기형 모두 유사한 결과를 나타내었지만, 보고에 의하면 피뢰기가 일정온도 이상 상승하게 되면, 피뢰기 표면 온도보다도 내부의 ZnO 소자의 온도가 높으며, ZnO 소자의 온도가 정상상태로 되기까지 더 많은 시간이 소요되는 것으로 알려져 있다[8].

그림 8은 그림 4의 결과를 좀 더 고찰하기 위해서, 시료 2와 3에 대해서 시간에 따른 누설전류 특성을 나타낸 것으로, 항온조를 120 °C로 유지시킨 후 피뢰기의 최대 연속 운전전압을 매시간마다 인가하여 시간에 따른 누설전류의 경향을 조사하였다. 이 실험에서 연속운전전압을 연속적으로 인가하지 않은 것은 ZnO 바리스터 소자의 과전수명 특성의 영향을 배제하기 위함으로 제작된 피뢰기에 사용된 ZnO 바리스터 소자는 연속운전전압을 연속적으로 인가하게 되면 누설전류가 시간에 따라 감소하는 negative creep 현상이 나타나기 때문에

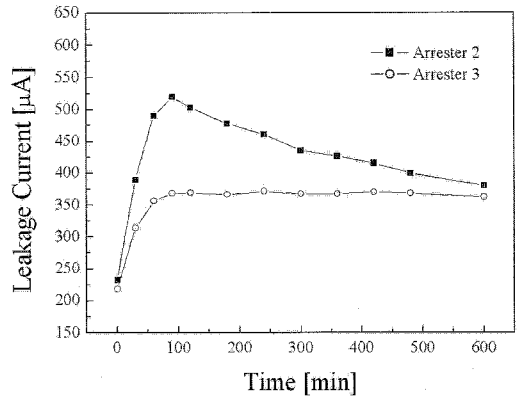


그림 8. 120 °C에서 피뢰기 누설전류 변화.
Fig. 8. Variation of leakage current at 120 °C.

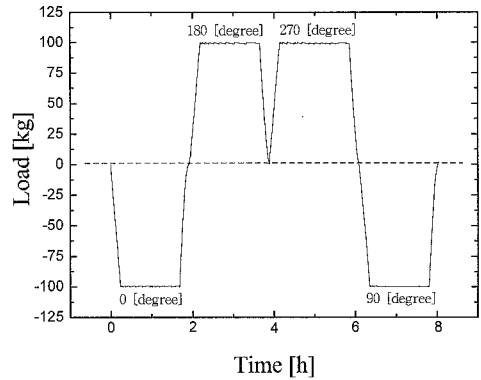


그림 9. 시간에 따른 캔틸레바 인가 사이클.
Fig. 9. Cantilever load cycle with time.

누설전류가 점차적으로 감소하게 된다. 그렇게 되면 피뢰기의 전체 누설전류를 측정할 때 ZnO 바리스터 소자의 영향으로 계면 특성을 평가하는데 영향을 미치게 된다. 따라서 시간 간격을 두고 불연속적인 전압인가로 계면 특성을 조사하였다. 그 결과는 그림과 같이 습식 삼입형인 시료 2는 1시간 30분에서 최고 누설전류인 520 µA까지 흐른 후 서서히 감소하여 점점 시료 3의 누설전류값에 근접하는 특성을 나타내었으며, 일체형인 시료 3은 1시간 30분부터 누설전류가 약 370 µA를 계속 유지하여 안정화되었다. 이와 같은 결과로부터 시료 2의 경우는 피뢰기 내부 및 외부의 온도가 평형상태를 유지하기 위해서는 계면에 처리된 그리스의 영향으로 다소 시간이 필요한 것으로 판단되었으며, 시료 3의 경우는 직접 사출에 의해 보다 빨

리 온도 평형 상태를 유지한 것으로 판단되었다.

한편 폴리머 피뢰기의 thermo-mechanical 실험은 그림 9와 같이 시간에 따른 외팔보 강도를 0°, 180°, 270° 및 90°의 방향으로 인가하였다. 먼저 0°, 90°로 당길(pulling) 때는 시료 1, 2, 3에 대해 각각 47 mm, 50 mm, 57 mm로 나타났으며, 부하 제거후의 잔유 변위는 2~3 mm 정도로 나타났다. 그리고 (pushing)에는 시료 1, 2, 3 모두 50 mm의 변위와 3 mm 정도의 잔유 변위를 나타내었다.

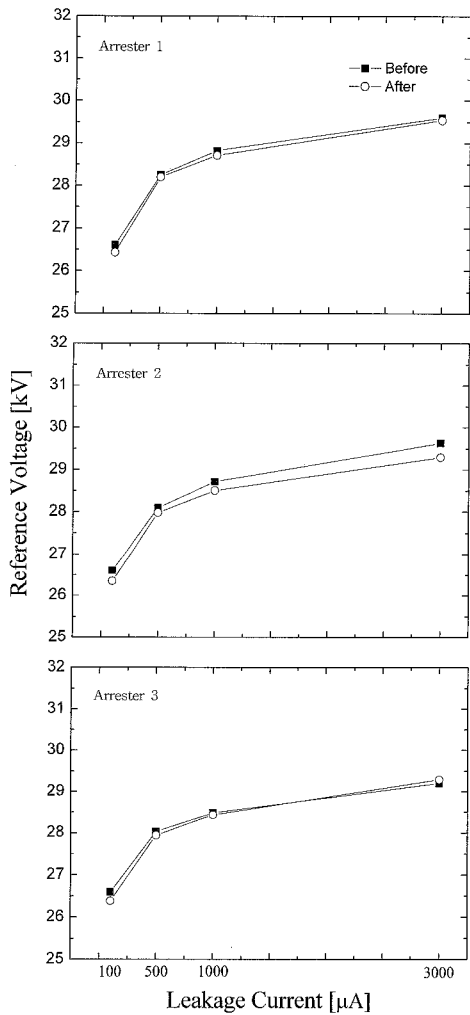


그림 10 수분침투시험 전·후의 동작개시전압 변화.
 Fig. 10. Variation of reference voltage with before and after thermo-mechanical test.

그림 10은 수분침투시험 전·후의 동작개시전압을 나타낸 것으로 사용된 시료의 경우 100 μA , 500 μA , 1 mA, 3 mA 순으로 저 전류 영역에서부터 점차적으로 측정하였다. 동작개시전압은 일체형, 건식 삽입형, 습식 삽입형 순으로 나타났으며, 특히 습식 삽입형의 경우에 실험전, 후에 있어서 전압 감소를 나타내고 있는데 이는 수분침투시험 중 시료가 부분적으로 불안정해진 것으로 사료된다. 일반적으로 동작개시전압은 소자의 열화가 진행함에 따라 입계의 저항이 감소하고 열화를 가져와 전압이 감소하는 경향을 나타낸다. 더군다나 동작개시전압의 변화가 커질수록 누설전류의 증가로 피뢰기의 전력손실이 증가하므로 통상적으로 10% 이내로 규정하고 있음을 고려할 때 10%에 훨씬 못 미치는 값으로 열화의 정도를 평가하기는 어려움이 있다.

그림 11은 수분침투시험 전·후의 누설전류를 나타내었다. 피뢰기의 누설전류의 경우 초기치의 1.3~1.5배를 기준으로 하여 열화 정도를 판단하고 있다. 수분침투시험 전·후의 누설전류 변화는 시료 1~3에 있어서 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며, 동작개시전압 특성과 더불어 실험 전·후의 열화 정도를 나타내기에는 아주 작은 값을 나타내고 있다. 그러나 습식 삽입형 피뢰기의 경우 동작개시전압에서도 언급되었던 것처럼 실험 시료 중에서 가장 큰 누설전류 증가폭을 보여 전압-전류 특성이 다소 저하된 것으로 나타났다.

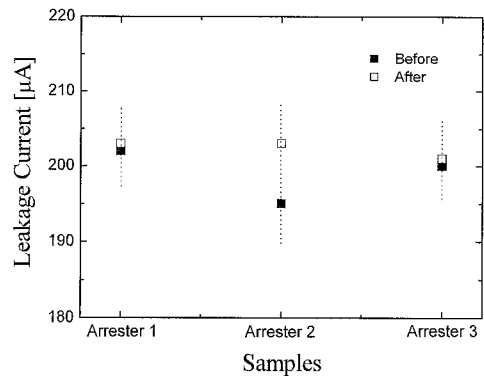


그림 11. 수분침투시험 전·후의 AC누설전류 변화.
 Fig. 11. Variation of leakage current with before and after thermo-mechanical test.

그림 12는 수분침투실험 전·후의 인가 전압에 대한 손실계수 변화를 나타낸 것이다. 피뢰기의 손실 계수는 ZnO 바리스터 소자의 전도성 캐리어의 전기저항으로 인한 오음적 손실과 쌍극자 회전시의 재료 점성저항에 의한 마찰손실의 합으로 나타난다. 피뢰기에 전압이 인가되면 마찰손실은 문제가 되지 않으므로 전도성 캐리어에 의한 누설전류가 증가하여 손실계수 또한 증가하게 된다. 따라서 인가전압이 증가하면 손실계수도 증가하는데 본 실험에서도 동일한 경향을 확인할 수 있었다. 한편

각각의 시료에 대한 수분침투실험 결과, 일체형, 습식 조립형, 건식 조립형 순으로 특성이 확인되었으며, 열화로 인한 기밀에는 이상이 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 정격 18 kV, 5 kA의 배전용 피뢰기의 구조에 따른 복합열화 및 온도 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 제작된 폴리머 피뢰기들에 대해 복합열화실험을 실시하였으며, 모든 시료들은 실험전·후에 AC 전체 누설전류와 동작개시전압의 변화가 없이 열화가 발생하지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 시료 1~3의 폴리머 피뢰기들은 100 °C 이하에서는 제조방법에 관계없이 모두 비슷한 누설전류를 나타내었으나, 100 °C~120 °C에서 습식 삼입형, 건식 삼입형, 일체형 피뢰기 순으로 누설전류가 감소하는 현상을 나타내었다.
- 3) 습식 삼입형 폴리머 피뢰기의 경우 120 °C의 누설전류 상승은 피뢰기 모듈(module)과 폴리머 하우징 사이의 피뢰기 제작에서 기밀성능 향상 및 작업의 용이성을 위해 사용된 그리이스(grease)의 영향인 것으로 판단되었다.
- 4) 제작된 폴리머 피뢰기들의 경우 구조에 관계없이 모두 비슷한 열방출 특성을 나타내었으며, 자기형 피뢰기는 낮은 누설전류에도 불구하고 폴리머형에 비해 내부 공기층으로 인해 열방출 능력이 저하한 것으로 나타났다.
- 5) Thermo-mechanical 실험에서 수평 하중에 따라 0°, 90°일 때 시료의 변위는 47, 50, 57 mm, 이며, 하중을 제거한 후의 잔유 변위는 2-3 mm로 나타났다.
- 6) Thermo-mechanical 실험에 의한 수분침투실험에서 동작개시전압은 거의 변화하지 않았으며, 또한, 누설전류에 있어서도 미소한 변화만이 나타났을 뿐 열화로 인한 기밀에 있어서 특성 변화는 나타나지 않았다.

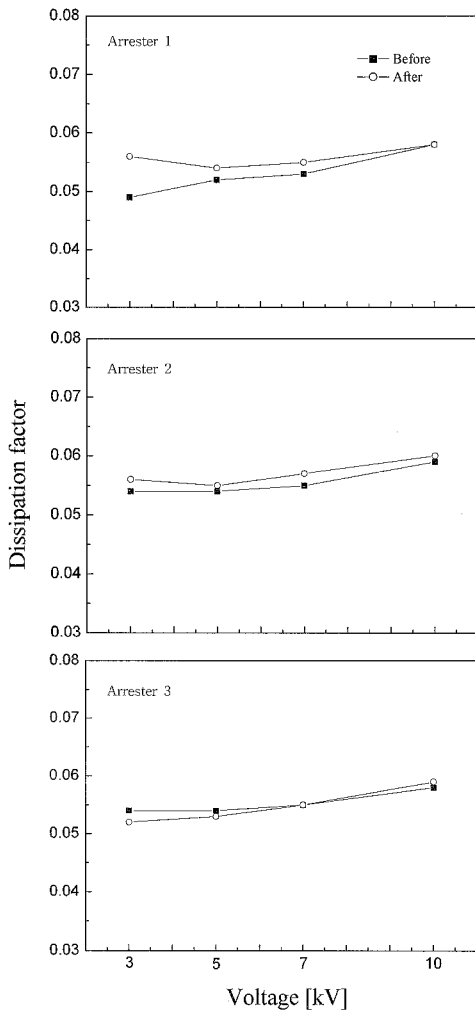


그림 12. 시험 피뢰기의 손실계수 변화.
Fig. 12. Variation of dissipation factor of arresters.

참고 문헌

- [1] L. M. Levinson and H. R. Philipp, "Zinc oxide varistors-a review", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 65, p. 639, 1986.
- [2] T. K. Gupta, "Application of zinc oxide varistors", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, p. 1817, 1990.
- [3] E. C. Sakshaug, "A brief history of AC surge arrester", IEEE Power Eng. Review, No. 8, p. 11, 1991.
- [4] K. Lahti, B. Richter, K. Kannus, and K. Nousiainen, "Behaviour of the DC leakage currents of polymeric metal oxide surge arresters in water penetration tests", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, p. 459, 1998.
- [5] K. Lahti, B. Richter, K. Kannus, and K. Nousiainen, "Internal degradation of polymer housed metal oxide surge arresters in very humid ambient conditions", IEEE High Voltage Engineering Symposium, 1999.
- [6] K. Lahti, K. Kannus, and K. Nousiainen, "A comparison between the DC leakage currents of polymer housed metal oxide surge arresters in very humid ambient Conditions and in Water Immersion Tests", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, p. 163, 1999.
- [7] K. Lahti, K. Kannus, and K. Nousiainen, "Diagnostic methods in revealing internal moisture in polymer housed metal oxide surge arresters", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, p. 951, 2002.
- [8] J. H. He, S. W. Han, and H. G. Cho, "Thermal properties of whole-solid insulated polymeric ZnO surge arrester", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Conf., Vol. 3, p. 568, 1998.