

논문 20-6-15

열-기계적 스트레스가 폴리머 피뢰기의 전기적 특성에 미치는 영향

Effect of Thermal Mechanical Stresses on Electrical Characteristics of Polymer Housed Surge Arresters

조한구^{1,a}, 유대훈¹
(Han-Goo Cho^{1,a} and Dae-Hoon You¹)

Abstract

This paper describes the results of a study on the sealing integrity of polymer housed surge arrester based on the thermal mechanical test. The polymer housed surge arrester employs silicone insulating materials for its housing, instead of the conventional porcelain housing. The polymer housed surge arresters exhibited the highest sealing integrity because it is not air volume between the FRP(fiber reinforced plastics) module and the silicone housing. In accordance, the sealing integrity of station class surge arresters is investigated with moisture ingress test. And, the influence of sealing integrity was evaluated through such as measurement of the deflection, reference voltage, leakage current. In electrical characteristics, reference voltage decreased in the range of 16.45~16.15 kV with after thermal mechanical test. In contrary, despite the continued moisture ingress, the polymer housed surge arresters exhibited almost the same leakage current value and the resistive leakage current has risen slightly. As a results, It was thought that the polymer housed surge arresters shows good stability with sealing integrity.

Key Words : Surge arresters, Polymer housing, Sealing integrity, Deflection, Leakage current, Airtight

1. 서 론

전력계통에서 발생하는 이상 과전압은 변압기, 개폐기 등 전력설비와 전력기기를 열화시키는 주원인이 된다. 따라서 안정적 전력공급 및 계통의 안정화를 위한 서지 억제 대책은 대단히 중요하며 이러한 보호대책으로 피뢰기가 다양한 모델로 폭 넓게 사용되고 있다. 피뢰기는 이상전압을 흡수해 전력기기를 보호하고 사고 이후에도 전력을 신속히 공급하는 중요한 보호 장치이다. 근래에는 비직선 전압-전류 특성이 우수한 산화아연 소자 개발

에 의해 피뢰기의 보호능력이 현저히 향상되었으며 이를 적용한 무공극 방식(gapless type)의 피뢰기가 실용화되어 사용되고 있다[1,2].

한편 피뢰기는 하우징(housing) 재질에 따라 자기 및 폴리머 피뢰기로 구분할 수 있으며 최근에는 소형, 경량 및 방압에 있어서 안전성에 큰 장점이 있는 폴리머 하우징을 적용한 피뢰기가 확대되고 있다[3]. 이러한 폴리머 피뢰기는 전극 캡과 하우징과의 계면접착, 하우징과 FRP(fiber reinforced plastics)와의 계면 접착에 있어 공기층(air volume)이 거의 없으므로 산화아연 소자로의 수분 유입을 막아 피뢰기 사고율을 현저히 떨어뜨리는데 큰 효과가 있다. 특히 내부의 산화아연 소자는 구조적으로 다결정 소결체이기 때문에 수분이 유입될 경우 습기가 축적 및 응축되어 내부단락을 일으키므로 피뢰기의 기능에 매우 큰 영향을 미치게 된다

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)

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

접수일자 : 2007. 3. 19

1차 심사 : 2007. 4. 17

심사완료 : 2007. 5. 16

[4-6]. 실제로 전력계통 사고 중 많은 부분은 피뢰기의 열화에서 발생되고 있으며 그 중에서도 하우징 열화 및 제작 불량으로 인한 수분 침투가 전체의 85.6 %에 이르고 있다. 따라서 사고의 주원인인 흡습에 대해 완벽한 기밀구조를 가지는 피뢰기의 제작은 대단히 중요하며 이를 위해 지속적인 연구와 노력이 필요할 것으로 사료된다.

본 논문에서는 폴리머 피뢰기를 제작하고 열-기계적 스트레스 시험을 실시하였으며 하중에 따른 피뢰기의 변위, 동작개시전압, AC 누설전류와 3고조파 전류를 측정하여 기밀성능에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시료 제작

시료인 폴리머 피뢰기에 있어서 내부 모듈(module) 제작은 다수의 산화아연 소자를 적층한 후 상부 및 하부에 Al spacer와 Al 지지 디스크를 차례로 연결하는 구조로 산화아연 소자 적층체의 주위에는 FRP 지지대를 전극 단자의 고정 플랜지에 조립하였다. 특히 FRP 지지대간의 거리는 Al spacer에 의해 보정되며, 전극 단자에 접시 스프링(corn disk)을 설치하여 산화아연 소자들과의 일정한 압력을 유지하도록 설계하였다. 피뢰기 모듈이 제작된 후에는 기계적 강도 향상을 위해 케블라 섬유(kevlar fiber)를 이용하여 필라멘트 와인딩하였다. 피뢰기 하우징은 흡습에 대한 완벽한 기밀구조 및 하우징은 액상 실리콘 고무로 일체형으로 성형하였으며 그림 1에 개략적인 피뢰기 모듈의 제조 방법을 나타내었다.

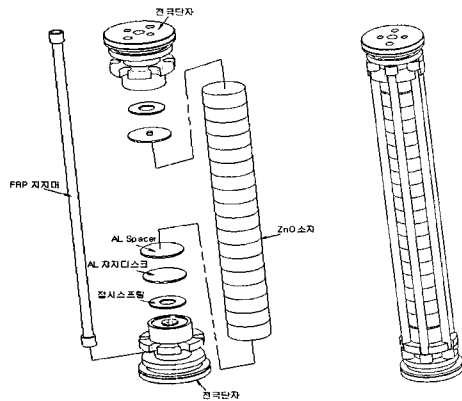
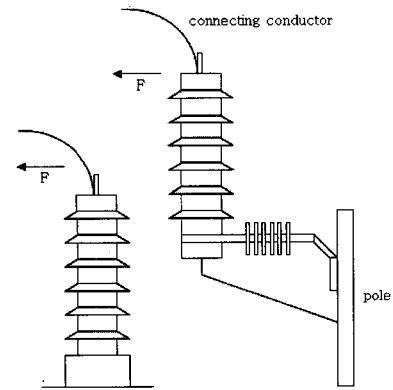


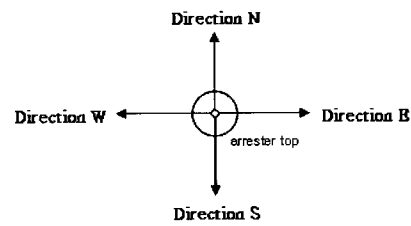
그림 1. 피뢰기 모듈 제작 방법.
Fig. 1. Manufacturing methods of arrester module.

2.2 열-기계적 시험

일반적으로 옥외용으로 사용되는 폴리머 피뢰기는 각종 환경조건에서의 오존, 자외선, 습기 및 기계적 스트레스와 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 범위의 온도변화를 가지고 있다. 그리고 그림 2(a)와 같이 좌립형(station type) 및 지지형(post type) 피뢰기의 경우 바람, 눈 및 도체의 영향으로 수평 하중(horizontal tension load)이 걸리게 된다. 따라서 피뢰기의 수분침투에 대한 영향을 평가하기 위해선 이러한 환경 요소들은 고려해야 하며 이를 위해 그림 3과 같은 부하 및 온도 사이클을 가지는 열-기계적 시험을 실시하였다. 온도변화는 96시간 사이클로 이루어지며 임의의 온도에서 시료를 그림 2(b)와 같이 4 방향으로 수평 하중을 가하면서 제시된 최대 연속 하중을 인가하였다. 피뢰기의 수평하중은 열-기계적 시험에 의거하여 최대연속 수평하중인 365 kgf를 인가하였다[7]. 또한 보다 가혹한 기밀 성능을 확인하기 위하여 최대 25 %까지 높은 하중을 인가하여 피뢰기 기밀성능을 조사하였다.



(a) 기계적인 스트레스



(b) 수평 하중

그림 2. 열-기계적 시험에서의 기계적 스트레스와 수평 하중.

Fig. 2. Mechanical stress and horizontal tension load during thermal mechanical test.

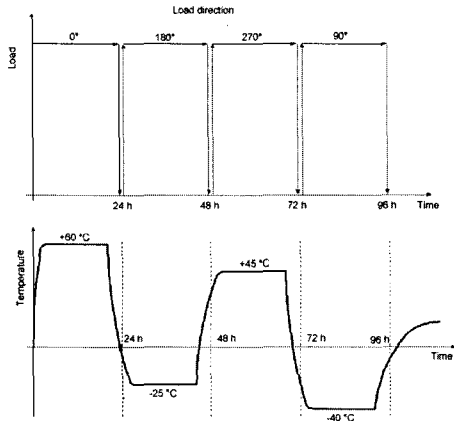


그림 3. 수평하중과 및 온도 사이클.
Fig. 3. Deflection with horizontal tension load.

표 1. 열-기계적 시험 사이클.
Table 1. Horizontal tension load and temperature cycle.

No.	습도	온도	인가하중	시간
1st	30 %	70 °C	360 kgf	96 hrs
2nd	40 %	70 °C	396 kgf	96 hrs
3rd	50 %	70 °C	414 kgf	96 hrs
4th	60 %	70 °C	432 kgf	96 hrs
5th	70 %	70 °C	450 kgf	96 hrs

습도의 경우 통상적인 여름주기 40~70 %와 겨울주기 30~60 %를 모두 고려하여 30~70 % 범위로 순차적으로 증가시키며 시험을 진행하였다. 이후 풀리머 피뢰기의 성능 평가는 육안 검사를 통한 피뢰기 외관 및 하우징의 특성 변화와 더불어 동작개시전압, AC 누설전류와 3고조파 누설전류를 측정하여 시험 후의 전기적인 특성 변화를 비교하여 기밀성능에 대해 검토하였다. 자세한 열-기계적 시험 사이클을 표 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피뢰기의 힘 및 변위 특성

그림 4는 1차 열-기계적 시험의 캔틸레바 인가 사이클을 나타낸 것으로 이 후 동일한 방법으로 하중을 증가시켜 피뢰기 기밀성능을 조사하였다.

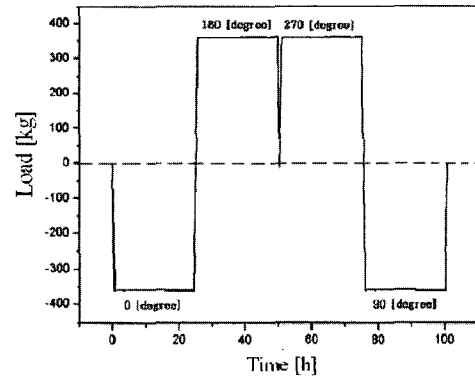


그림 4. 시간에 따른 수평 부하 인가 사이클.
Fig. 4. Horizontal tension load cycle with time.

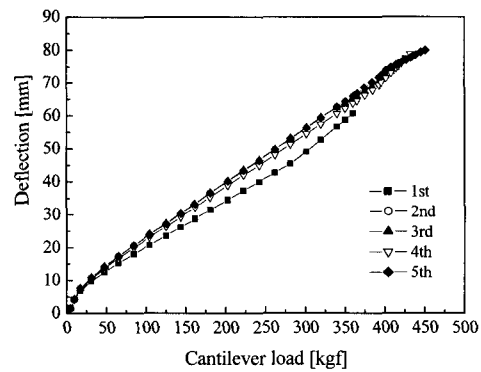


그림 5. 수평 인가 하중에 따른 변위 특성.
Fig. 5. Deflection with horizontal tension load.

온도분포는 상온에서 70 °C의 분위기에서 수평하중을 인가하였으며 부하 방향은 0°, 180°, 270° 및 90° 순으로 인가하였다. 피뢰기의 최대 연속 수평 부하인 365 kgf를 인가한 1차에서는 당길 때 (0°, 90°)의 경우 55 mm로 나타났으며 밀 때(180°, 270°)의 경우 63 mm의 값으로 밀 때의 변위가 당길 때보다 8 mm 정도 크게 나타났다. 반면에 2차 수평 부하 시험 이후에서는 2~3 mm 정도의 변화를 나타내었으며, 밀 때와 당길 때의 변위 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 인가 하중이 증가할수록 피뢰기의 변위는 각각 71, 75, 77, 80 mm로 나타났으며 수평하중이 5 % 증가할 때마다 2 mm 정도의 휨이 발생되는 것으로 나타났다.

한편 본 시료와 동일 전압 및 구조를 갖는 피뢰기의 경우 약 163 kgf의 하중에서 173 mm 정도의 변위 특성이 보고된 바 있으며 이와 같은 결과를

불 때 본 논문에서 제작된 폴리머 피뢰기의 기계적 강도는 상당히 우수한 것을 알 수 있다[8].

그림 5는 인가화중에 따른 변위 특성을 나타낸 것으로 피뢰기의 변위 특성은 큰 차이를 나타내지 않았으며 1차 시험보다는 2차 시험에서 변위의 증가폭이 다소 높게 나타났다. 하지만 이후의 시험에서는 2차와 유사한 변위 특성을 나타내었으며 수평 부하 하중이 396 kgf 이상으로 증가하여도 피뢰기는 초기의 변위 특성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 한편 수평 부하 하중 인가 및 제거 후에도 잔유변위가 나타나지 않았는데 이러한 결과를 볼 때 본 시험에 사용된 피뢰기의 기계적 강도는 매우 우수한 것을 알 수 있으며, 본 논문에서 제작한 피뢰기는 수평 부하 하중 및 인장강도 등 기계적 강도가 전반적으로 증가한 것에 기인하는 결과로 사료된다.

3.2 동작개시전압 특성

그림 6은 열-기계적 시험 전·후의 DC 동작개시전압을 나타낸 것으로 사용된 시료의 경우 100 μ A, 500 μ A, 1 mA 및 3 mA 순으로 저전류 영역에서부터 고전류 영역까지 측정하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 열-기계적 시험에 따른 전압의 변화는 거의 없으며 피뢰기는 안정된 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 고전류 영역보다 저전류 영역에서 다소 전압 변화가 큼을 알 수 있는데 이는 산화아연 소자의 입계 열화 및 온도 의존성이 강한 예비항복영역의 특성에서 기인하는 결과로 사료된다. 피뢰기의 동작개시전압(1 mA) 변화를 살펴보면 +0.2 % ~ -1.8 %의 범위로 열-기계적 시험 후 전압이 소량 감소하는 negative 특성을 나타내었다.

일반적으로 피뢰기의 동작개시전압은 입계의 열화가 진전될수록 전압이 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 열화 메커니즘에 의해 각 스트레스간의 변화폭으로 열화정도를 예상할 수 있는데 본 피뢰기의 경우 통상적인 10 % 이내에도 훨씬 못 미치는 5 % 이내의 값으로 소자의 흡습에 따른 열화를 판단하기에는 다소 무리가 있다고 사료된다. 따라서 열-기계적 시험에 따른 피뢰기의 누설전류의 거동을 조사함으로써 피뢰기의 기밀 특성을 확인해야 할 것으로 사료된다.

3.3 AC 누설전류 특성

그림 7은 열-기계적 시험에 따른 피뢰기의 AC 전 누설전류 변화를 나타내었다. 일반적으로 피뢰

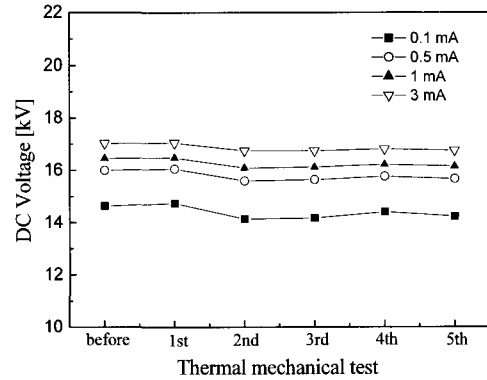


그림 6. 열-기계적 시험 전·후의 DC 동작개시전압 변화.

Fig. 6. Variation of reference voltage with before and after thermal mechanical test.

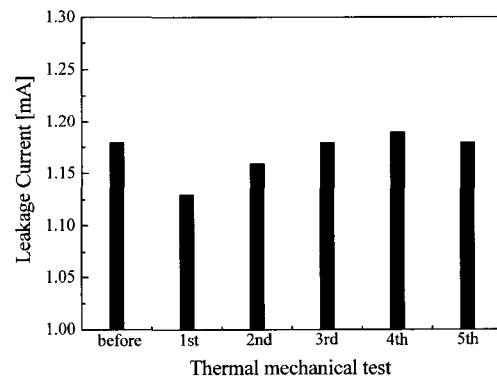


그림 7. 열-기계적 시험 전·후의 누설전류 변화.

Fig. 7. Variation of leakage current with before and after thermal mechanical test.

기의 누설전류는 피뢰기의 열화를 진단하는 매우 중요한 요소이며 초기치의 1.3~1.5배를 기준으로 하여 열화 정도를 판단한다. 따라서 피뢰기의 열화 판정을 위해 가장 중요한 것은 누설전류의 양이다.

3.4 3고조파 전류 특성

그림 8은 최대연속 운전전압(MCOV)에서의 시료에 흐르는 전 누설전류와 초기 3고조파 전류를 나타낸 것이다. 피뢰기의 누설전류는 소자 자체의 용량분과 저항분 누설전류의 합성으로 나타나며, 소자의 열화시 용량성 전류는 거의 변화하지 않으나 저항분 전류는 크게 증가하게 된다. 따라서 피

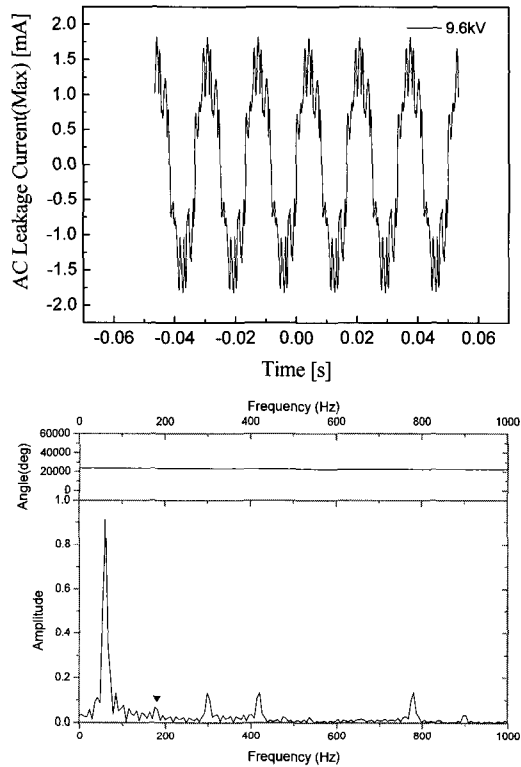


그림 8. 피뢰기의 누설전류 및 FFT 분석.
Fig. 8. AC leakage current and FFT analysis of arresters.

뢰기의 열화 특성을 규명하는데 있어 변화폭이 큰 저항분 전류의 측정은 수분 침투에 대한 피뢰기의 열화 정도를 판정할 수 있는 중요한 요소로 이용될 수 있다[9]. 본 시험에서는 그림 8과 같이 피뢰기의 AC 누설전류를 통해 FFT 분석을 하였으며 3고조파 전류를 검출하여 초기 저항분 전류 61 μA 를 확인하였다.

그림 9는 열-기계적 시험 전·후의 3고조파 전류 변화를 나타낸 것으로 시험 횟수가 진행될수록 저항분 전류는 비교적 증가하는 positive 누설전류 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 열-기계적 시험 후 피뢰기의 저항분 전류는 초기 저항분 전류보다 약 29 μA 정도 증가하여 피뢰기의 열화가 미소하게 진행된 것으로 나타났다. 하지만 변화의 폭이 너무 적어 산화아연 소자의 열화로 보기는 어려운 것으로 판단된다. 특히 피뢰기에 열화가 발생한다면 필연적인 동작개시전압의 특성 변화를 보였겠지만 그렇지 않음을 고려할 때 흡습에 따른

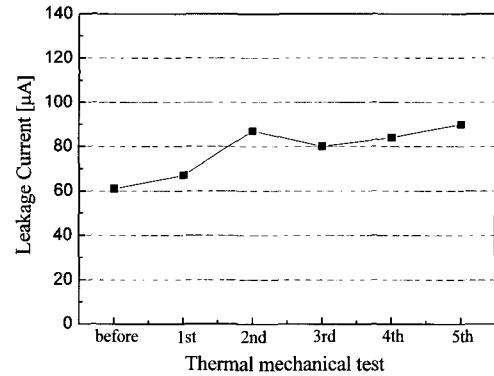


그림 9. 열-기계적 시험 전·후의 3고조파 전류 변화.
Fig. 9. Variation of third harmonic current with before and after thermal mechanical test.

피뢰기의 열화는 더욱 아닌 것으로 사료된다. 이러한 저항분 전류의 증가는 열-기계적 시험시 피뢰기의 표면 온도 상승에 그 원인이 있으며 이는 온도가 증가할수록 전류 캐리어 밀도가 증가하여 강한 온도 의존성을 보이고 있다[10].

4. 결론

본 논문에서는 좌립형 폴리머 피뢰기의 기밀 성능을 검토하기 위해 열-기계적 시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

- 1) 초고압용 폴리머 피뢰기에 대한 열-기계적 실험을 시행한 결과 수평 부하 하중이 증가할수록 피뢰기의 변위는 각각 55, 71, 75, 77, 80 mm로 증가하였으며 수평하중이 5 % 증가할수록 2 mm의 변위가 발생하는 것으로 나타났다.
- 2) 피뢰기는 수평 부하 하중이 증가하여도 초기의 변위 특성을 유지함으로써 균일한 변위 증가를 나타내었으며, 수평 부하 하중 인가 및 제거 후에도 잔류변위는 나타나지 않았으며 초기의 형태를 유지하고 있었다.
- 3) 피뢰기의 동작개시전압은 열-기계적 시험 후 전압이 소량 감소하는 negative 특성을 나타내었으며, 2 % 이내의 변화로 수분의 흡습이나 침투에 따른 열화를 판단하기에는 다소 무리가 있었다.

- 4) 열-기계적 시험의 횟수 증가에 따라 지속적인 누설전류 값의 변화를 검토했던 결과 열-기계적 시험이 끝난 후에도 흡습에 의한 피뢰기의 특성 변화는 없는 것으로 나타났다.
- 5) 열-기계적 시험 후 피뢰기의 3고조파 전류는 초기 저항분 전류보다 29 μA 증가하였으나 이는 산화 아연 소자의 자체의 과전열화 특성에 따른 결과로 나타났다.
- 6) 본 논문에서 설계 제작된 피뢰기는 열-기계적 시험 후에서 전기적 특성은 크게 변하지 않았으며, 우수한 기밀성으로 수분 침투 성능에서도 상당히 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] L. M. Levinson and H. R. Philipp, "Zinc oxide varistors 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] V. Chaudhry, R. S. Gorur, R. S. Dyer, and R. Thallam, "Electrical performance of polymer housed zinc oxide arresters under

- contaminated conditions", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 2, p. 696, 1995.
- [4] J. A. Bennett, J. P. Mackevich, and R. J. Mosso, "Innovation in polymer arrester moisture sealing testing", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No. 1, p. 237, 2004.
- [5] E. A. Cherney, B. Biglar, and S. Jayaram, "Salt fog testing of polymer housed surge arresters", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, p. 252, 2001.
- [6] K. Lahti, K. Kannus, and K. Nousiainen, "Diagnostic methods in revealing internal moisture in polymer housed metal oxide surge arresters", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No. 4, p. 951, 2002.
- [7] IEC 60099-4, "Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", 2004. 5.
- [8] K. Steinfeld, B. Kruska, and W. Welsch, "Manufacturing and application of cage design voltage metal oxide surge arresters", international symposium on high voltage engineering, 2003.
- [9] 길정석, 한주섭, 송재용, 조한구, "누설전류의 파고분석에 의한 피뢰기 진단기술 및 장치", 대한전기학회논문지, 52C권, 12호, p. 46, 2003.
- [10] 조한구, 유대훈, 이운용, 김하나, "폴리머 피뢰기의 구조에 따른 온도와 누설전류 특성", 전기전자재료학회논문지, 20권, 3호, p. 273, 2007.