

전철 탑재형 피뢰기의 모듈설계 및 성능평가기술

조한구 · 김석수 · 한세원 · 이운용
한국전기연구소

Module Design and Performance Evaluation of Surge Arrester for Loading in Railway Rolling Stock

H.G. Cho · S.W. Han · U.Y. Lee · S.S. Kim
Korea Electricechnology Research Institute

Abstract - The main objective of this paper is to design and test a new type of polymer ZnO surge arrester for AC power system of railroad vehicles. Metal oxide surge arrester for most electric power system applications, electric train and subway are now being used extensively to protect overvoltage due to lightning. Surge arresters with porcelain housing must not have explosive breakage of the housing to minimize damage to other equipment when subjected to internal high short circuit current.

When breakdown of ZnO elements in a surge arrester occurs due to flashover, fault short current flows through the arrester and internal pressure of the arrester rises. The pressure rise can usually be limited by fitting a pressure relief diaphragm and transferring the arc from the inside to the outside of the housing. However, there is possibility of porcelain fragmentation caused by the thermal shock, pressure rise, etc. Non-fragmenting of the housing is the most desired way to prevent damage to other equipment. The pressure change which is occurred by flashover become discharge energy. This discharge energy raises to damage arrester housing and arrester housing is dispersed as small fragment. Therefore, the pressure relief design is requested to obstruct housing dispersion.

The main research works are focused on the structure design by finite element method, pressure relief of module, and studies of performance of surge arrester for electric railway vehicle.

1. 서론

전철 시스템에서 과전압에 의한 서지를 억제하는 것은 안전한 철도 운행면에서 대단히 중요하다. 현재까지 피뢰기는 뇌 과전압이나 스위칭 과전압을 억제하는 중요한 요소로 개발되고 있으며, 전철 차량에 장착되면 시스템은 가혹한 뇌로부터 보호가 가능하다. 산화아연형 소자를 갖는 새로운 무공극 피뢰기의 개발은 넓은 범위의 전압에 대해서 낮은 보호레벨 그리고 높은 에너지 흡수성능을 보장할 수 있게 한다.

또한, 전철 차량용 피뢰기의 하우징은 사용기간이 길고 기계적, 전기적 스트레스를 항상 받고 있을 뿐만 아니라 사용환경에 따라 오염물질의 종류와 오염정도의 차이는 있지만 오염물질에 노출되는 것을 피할 수 없다. 현재 사용중인 전철 차량용 절연물의 주류인 자기는 충격강도가 약하고 수축률이 클 뿐 아니라 기밀(air-tight), 방압에서의 구조적인 문제점이 지적

되고 있으며, 오손물질이 표면에 축적되면 친수성을 가져 누설 전류를 증가시키게 된다. 이와는 달리 고분자 하우징은 발수성의 표면에 따른 내오손성, 기계적 강도가 우수할 뿐만 아니라 대량생산이 가능하다. 또한, 기존의 자기질(porcelain) 에관의 피뢰기는 무겁고 고장전류에 의한 사고시 폭발로 인한 파편 비산으로 안전상의 문제를 내포하고 있지만, 고분자 하우징은 가볍고 폭발 비산에 대한 안전성이 우수하다.

본 논문에서는 전철 탑재형 고분자 피뢰기의 개발에 있어서 전철용 피뢰기의 설계적인 측면, 내부 모듈(module)설계 및 방압성능, 그리고 설계 및 제작된 피뢰기의 성능평가를 실시하였다. 먼저 피뢰기의 각 설계요소를 분석하여 이를 바탕으로 피뢰기를 설계하고, 방압성능을 검증하기 위하여 모듈로 제작된 피뢰기에 대해 고장전류시험을 실시하였다. 또한, 제작된 피뢰기를 상용주파 및 뇌충격 내전압, 절연저항, 동작개시 전압 등 여러 가지 시험을 실시하여 특성을 평가하였다.

2. 피뢰기의 설계

교류 전철 시스템에서 과전압을 제한하기 위해서 피뢰기는 발전소, 변전소, 전철 차량 등에 사용된다. 전력 공급원과 전차에 대한 과전압 보호는 전철 운행에 있어서 또한, 신뢰성 측면에서 매우 중요한 역할을 한다. 특히, 전철 차량에 설치되는 서지 보호 시스템으로는 두 가지 종류가 있다. 하나는 25kV와 같은 높은 동작전압을 갖는 피뢰기가 차량의 지붕에 탑재되어 있고, 다른 하나는 낮은 동작전압을 가지는 것으로 고조파로부터 보조항과 통제항을 보호하기 위해서 전철 차량의 내부에 설치된다.

이러한 전철 탑재용 피뢰기는 가혹한 기후조건, 기계적 진동, 오손물질 등에 노출되기 때문에 전기적, 열적, 기계적 안정성을 갖추어야 함과 동시에 고장전류에 의한 폭발 비산의 위험성이 없어야 한다. 현재, 세계 각국에서 사용되는 전철 차량용 피뢰기는 자기 하우징 피뢰기가 주류이며, ABB, Cooper 등에서 고분자 피뢰기를 개발하여 적용하고 있다.

2-1. 피뢰기의 설계요소

전철 탑재용 피뢰기를 구성하는 요소들은 먼저 ZnO소자와 소자를 둘러싼 FRP 모듈, 그리고 이들 외주를 절연하는 고분자 하우징, 뇌서지 침입시 열팽창에 의한 소자와 전극사이의 접촉저항을 낮추는 접촉디스크 등, 기밀구조를 유지하기 위한 상·하부전극, 전극캡, 하부지대 등으로 이루어진다. 그림 1에 전철용 피뢰기의 구조를 나타내었다.

1) 소자설계

우선 시스템에 가해지는 최대 시스템 전압, 연속사용 동작전압 등의 시스템 파라미터들을 결정해야 한다. 단지 일반적인 시스템 전압만이 주어지는 경우 최대 시스템 전압은 일반적인 시스템 전압의 5~10% 높게 설정하면 된다.

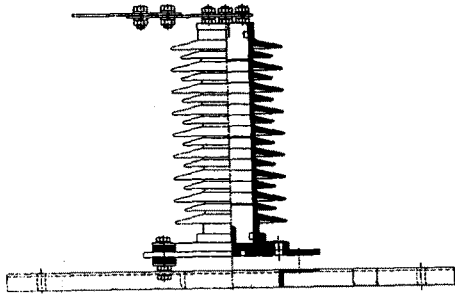


그림 1. 전철용 피뢰기의 구조

TOV(temporary overvoltage)의 크기와 동작시간, 또한 서지 스트레스에 대한 피뢰기의 에너지 내량을 설계하는 것도 중요한 요소들이다. 주어진 사양에 맞도록 피뢰기를 선택하는 것은 보호레벨, TOV 내량, 그리고 에너지 내량과의 복합적인 문제이다. ZnO소자의 직렬 블록 수를 늘려 TOV 내량을 증가시키는 경우 시스템 전압 스트레스에 의한 피뢰기의 장기 내구성은 향상되지만 주어진 보호 절연레벨에서 피뢰기에 가해지는 보호여유가 감소하게 되는 문제점이 발생한다. 한편 높은 에너지 내량을 갖도록 설계되면 사고위험은 줄어들지만 제조 비용이 증가하게 된다. 이러한 선정된 조건에 적합한 소자를 설계한다.

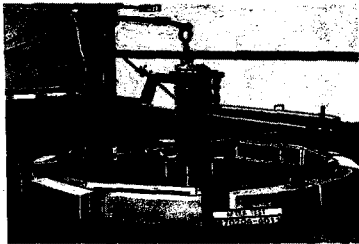


그림 2. 피뢰기의 고장전류 시험

2) 방압을 위한 FRP 모듈 설계

전차선로부터의 고장전류와 정격 이상의 뇌서지를 흡수한 피뢰기는 내부 ZnO소자에서 전기에너지가 열에너지로 바뀌면서 급격한 압력의 변화를 일으키게 되고, 압력 변화는 내부 용기를 팽창시키지만 ZnO소자를 수납하고 있는 내부 용기는 기밀유지를 위해 일정한 공간으로 밀봉되어 있기 때문에 내부 압력의 밀도는 증가하여 방출하려는 에너지로 나타난다. 따라서, 방출 에너지는 피뢰기의 하우징을 파손시키고 압력이 떨어지는 형태로 안정화되지만 파손된 하우징은 파편의 형태로 비산한다.

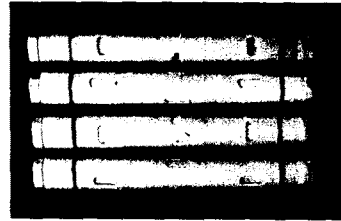
이와 같은 에너지 변환은 생기는 폭발, 비산을 방지하기 위하여 압력 완화용 형태로의 방압 설계는 중요하며, 방압성능을 위한 FRP 모듈의 패턴 설계는 대단히 중요하며 그림 2에 이의 시험방법을 나타내었다.

이 FRP 모듈은 ZnO소자와 상·하부전극, 접촉디스크가 삽입

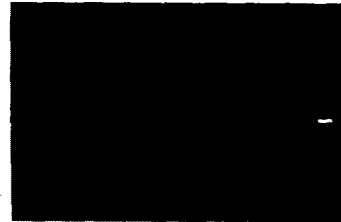
되는데, 이 접촉디스크는 내부 열팽창에 의한 소자와 전극사이의 접촉저항을 낮추며 소자와의 접촉을 용이하게 한다. 또한, 접촉디스크 안에 들어가는 디스크는 ZnO소자 및 전극의 온도변화나 FRP 모듈의 수축, 팽창에 견디도록 일정한 내하중을 유지한다.

그림 3 (a)는 CPW 공법에 의한 시험전의 시료의 형태를 나타내었으며, 그림 3 (b)는 필라멘트 와인딩 공법에 의한 시험전의 시료 형태를 나타내었다.

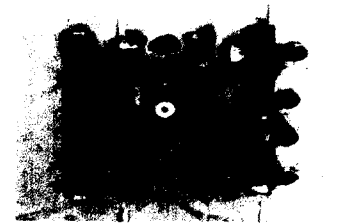
그림 3 (c), (d)는 시험후의 시료 형태와 파괴양상을 나타내었다. 파괴기 내부 단락시의 압력상승에 대해서는 FRP 부분의 전면에서 설치한 방압개소에서 그림 3 (f)과 같이 FRP의 미소한 부분이 찢어져 방압을 하고 있었으며, 파괴기 소자를 포함한 그 어느 부품의 조각도 비산하지 않았으므로 확실한 방압성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.



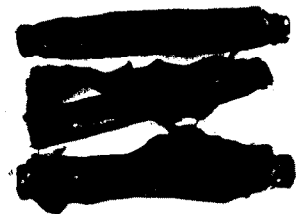
(a) 시험 전 시료상태



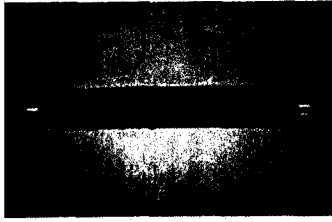
(b) 시험 전 시료상태



(c) 시험 후 시료상태



(d) 시험 후 시료상태



(e) 시험 후 시료상태

그림 3. 고장전류시험 전, 후의 시료 및 파괴형상 (10kA, 10cycle).



그림 3. 개발된 전철용 피뢰기의 외관

3) 외부 하우징 설계

전철 탑재용 피뢰기는 옥외환경에 노출되기 때문에 외부 하우징은 내오손성이 우수해야 한다. 고분자 하우징의 경우 자기하우징에 비해 내오손성이 우수하여 개발의 주류를 이루고 있다.

외부 하우징의 설계요소는 갓의 형상과 오손등급에 따른 누설거리, 외부 하우징 보호레벨(BIL) 등으로 고려할 수 있다. 갓의 형상에는 갓사이의 거리, 갓 돌출거리에 대한 간격의 비, 교대갓 또는 규릿갓 선택, 갓의 기울기 등의 파라미터들이 있다. 이들 파라미터들은 기후적인 조건과 누설거리 등을 고려하여 잘 선택되어야 한다.

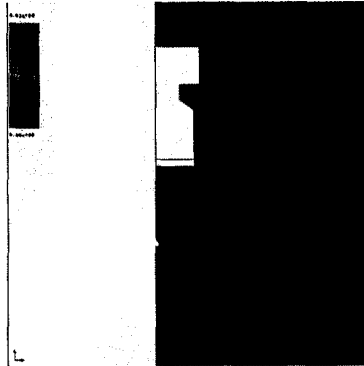


그림 2. 피뢰기의 전계분포

개발 피뢰기의 경우 교대갓을 갖는 형상을 선택하였으며 형상계수는 2.98로 내영형으로 적절하며, 간극/돌출거리는 1.25로 자기세정 조건을 갖기에 충분하였다. 또한 피뢰기의 전장은 BIL을 고려하여 설계하였다.

또한, 설계모델의 전계분포 특성을 알아보기 위해 전계해석 프로그램을 이용하였다. 해석결과를 그림 2에 나타내었다. 전계가 집중되는 곳은 주로 전극과 실리콘 고무의 계면, 전극과 접촉디스크, FRP가 만나는 곳, 접촉디스크와 ZnO소자, FRP가 만나는 계면에서 나타났다. 그러나, 최고 전계값은 이들 재료의 절연내력값에 미치지 못하는 것으로 보인다. 이러한 설계요소들을 고려하여 제작한 탑재용 피뢰기의 외관을 그림 3에 나타내었다.

3. 피뢰기의 시험평가

시험 결과 뇌충격 내전압, 상용주파 내전압 성능은 자기절연율을 크게 상회하였으며, 영분부착밀도 $0.35 \sim 0.5 \text{ mg/cm}^2$ 이상의 오손등급에서도 충분한 절연성능을 가지고 있음을 확인하였다. 또한, 고장전류에 의한 방압성능도 폭발에 의한 비산없이 안정된 결과를 나타내었다. 그리고, 피뢰기에서 중요한 표 5와 같은 시험을 실시한 결과 목표치를 만족하였다.

표 5. 피뢰기의 중요시험 결과

Test Item	Demanded Value	Test Values	
Residual Test	Lightning impulse residual voltage	$8/20\mu\text{s}U_{10kA} \leq 136\text{kV}$ (3.6 U_h)	99.4~100.2kV
	Steep impulse current residual voltage	$1/10\mu\text{s}U_{10kA} \leq 152\text{kV}$ (4.0 U_h)	94.2~94.8kV
	Switching impulse current residual voltage	$30/60\mu\text{s}U_{500kA} \leq 110\text{kV}$ (2.9 U_h)	79.6~79.8kV
Switching-load test	18 times under transmission line discharge Class 3	All samples passed	
Switching-load test	Pass the demanded test schedule	All samples passed	
Time characteristic test of power frequency voltage		1.20 U_h 0.1s 1.15 U_h 1s 1.08 U_h 30s 1.0 U_h 20min	

4. 결 론

본 연구에서는 전철 탑재용 피뢰기 제작을 위해 설계요소들을 검토하여 피뢰기를 설계하고 방압, 기밀성능을 위한 모듈 설계 및 전철 탑재형으로 적합한 피뢰기를 개발하였다. 또한, 제작된 피뢰기의 시험평가에서도 모두 양호한 특성을 나타내었다.

참고 문헌

- [1] H.G Cho et al, "Protective Effects to Lightning Overvoltages of Polymeric Arresters for AC Railroad Vehicles", ICEE '98, Vol. 1, pp. 808, 1998.
- [2] Albert Mayer, "Overvoltage Protection for AC Traction Power Supplies and Vehicles", ABB Review 3, 1994.
- [3] 한국전기연구소, "전철 탑재형 고성능 고압 피뢰기 설계 및 제조 기술 개발", 산업자원부.