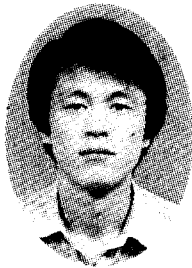


고분자 피뢰기의 설계 요소와 특성



김인성

한국전기연구소 전기재료연구부
절연·피뢰기 기술연구팀
선임연구원



조한구

한국전기연구소 전기재료연구부
절연·피뢰기 기술연구팀 팀장

1. 서 론

전력계통 전압의 승압에 의한 초고압화로 송·배전계통이 복잡하게 됨에 따라 각종 선로에서 발생하는 이상 과도전압(transient voltage surge)에 대한 억제 대책은 대단히 중요하다. 전력계통에 이상 과도전압이 유기되면 결과적으로 송·배전선로의 전력기에 절연 파괴를 일으키게 되고, 전력 수용

가에 고전압이 침입하여 전기.전자기기의 파괴 및 수명 단축을 가져오게 된다. 따라서, 현재 송·배전선로에서는 자기(porcelain)애관에 비직선성이 우수한 산화아연(ZnO) 소자를 적용한 무공극 방식(gapless type)의 피뢰기가 사용되고 있다.

기존의 자기 애관을 사용한 피뢰기의 하우징(housing)과 전극부분은 약 2배정도의 열팽창계수 차이를 가지고 있을뿐만 아니라 반복적인 냉열과 아크열에 의한 기계적 피로(stress)에 의해서 균열과 침식이 발생한다. 그리고, 애관 상·하부 전극사이의 기밀을 유지하기 위한 고무 가스켓(gasket, O ring)의 경년적인 압축응력과 열에 의한 변화로 탄성을 저하를 가져와 기밀성능을 떨어지게 함으로 흡습열화로 아크(arc)가 발생하여 파괴되고, 수분의 유입으로 습기가 축적(accumulation), 응축(condensation)되어 피뢰기 내부에서 섬락(flashover)을 일으킬 수 있으며, 또한 섬락에 의하여 관통파괴(puncture breakdown)가 일어난다. 낙뢰에 의한 아크 방전으로 폭발이 유도되어 파편이 비산하면 주변 전력기기의 손상 및 인명피해를 일으킬 수 있다. 그러나 고분자 하우징(polymer housing)을 적용한 피뢰기는 소형, 경량화뿐만 아니라 피뢰기 내부 단락시 방폭 성능을 향상시킬 수 있고 자기 애관은 외부 형상의 설계에 있어서 제조상의 제약이 따르기 때문에 누설거리를 늘리는 것 등 설계

상에 많은 어려움이 있는 반면 고분자 피뢰기는 사고의 주 원인인 흡습에 대한 완벽한 기밀구조와 하우징 설계의 자유도가 있기 때문에 내오손 성능을 향상시킬 수 있으며, 절연 부라켓(bracket)를 사용하므로써 절연거리가 늘어나는 등의 여러가지 장점을 가지고 있다.

고분자 피뢰기의 기술은 전기적 절연성능을 확보하기 위한 절연설계와 피뢰기의 기능을 확보하기 위한 구조설계, 고장전류에 대한 방폭설계 그리고 계면/접착 설계로 분류할 수 있다. 절연 설계는 재료의 선택, 안정적인 절연 형상, 누설거리 등이 해당되며, 구조설계는 ZnO 소자와 전극과의 기밀설계, 계면(interface) 접착 설계, 고장전류에 대한 방폭 구조 등이 해당된다. 기능에 따른 특성 설계는 선로의 써지보호 등급을 고려하여 소자의 선택과 직선 절연 거리를 산정할 수 있으며 표 1과 같이 요약 할 수 있다.

본 고분자 피뢰기 설계 요소와 특성에서는 피뢰기의 설계 및 적용시 하우징(housing)과 내부 요소와의 기밀성능을 위한 구조로서 전극 및 부품설계와 이를 조합하고 있는 필라멘트 와인딩(filament winding) 기술과 방압 구조에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 방압 구조

2.1. 고분자 피뢰기의 방압 개소
피뢰기가 갖는 작동 특성으로

불 때 뇌나 이상 전압과 같은 서
어지(surge)가 갑자기 회로로 유
입되는 것을 순간적으로 흡수 하
지만 정격 이상의 고장전류일 경

우 급격한 에너지의 변화에 대해
피뢰기는 폭발하게 되어 물적 인
적 피해를 초래한다. 물론 이러한
고장 전류에 대해 피해를 최소화

하기 위하여 폭발에 의한 파편의
비산 형태와 거리를 시험 조건으

로 사전에 제한 하지만 고분자 피
뢰기의 경우 초기 설계시 방압 편
홀(pin hole)과 방압 개소를 두어
제어를 함으로 이러한 '위험 요소
를 해결한다. 그림 1은 고장전류
에 대한 방압시험을 나타내고 있
는 것으로 중간에 설치된 시험용
피뢰기에서 일정 거리를 두고 파
편의 비산을 제한하고 있다.

표 1. 폴리머 피뢰기의 설계요소

Insulation housing	Material design	Base polymer(Filler, Additives) Manufacturing process Characteristics of insulation
	Shape design	Leakage distance Withstand voltage Shape of housing Inclination of shed Alternating or regular shed Shed number
Inner Factor Design	Inner factor design	Fault current Pressure relief
	Airtight design	FRP part/cap contact Filament winding
Adhesive/Interface design		Cap/FRP part Housing material/FRP part
ZnO Varister		Nonlinearity Leakage current Surge energy absorption

2.2 Pressure relief 구조

고장 전류와 뇌 썬지를 흡수한
피뢰기는 내부 ZnO 소자의 열에
너지에 의해서 급격한 팽창이 일
어난다. 이러한 압력 변화는 용기
를 팽창 시키지만 폭발을 미연에
방지하기 위하여 압력 완화용 출

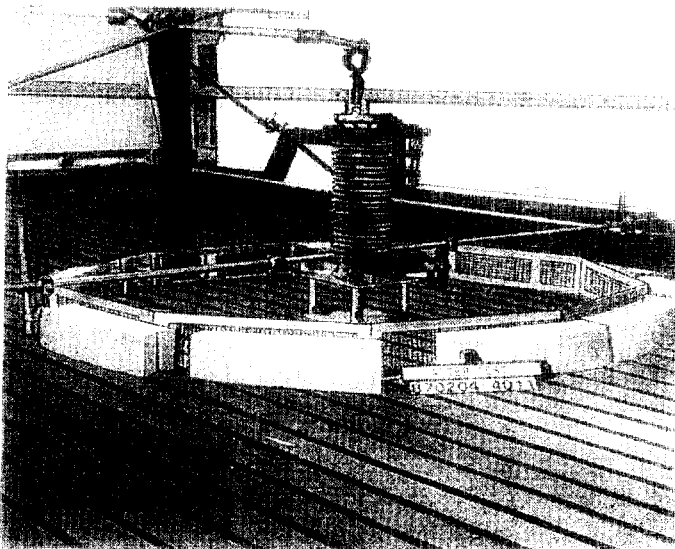


그림 1. 고장전류에 대한 Pressure relief 시험

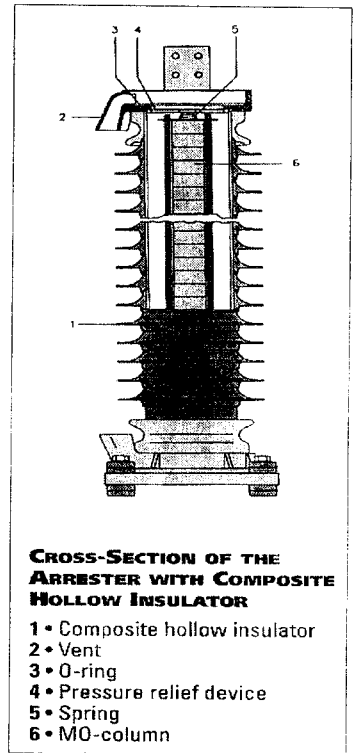


그림 2. Hollow insulator형의 폴리머 피뢰기 단면

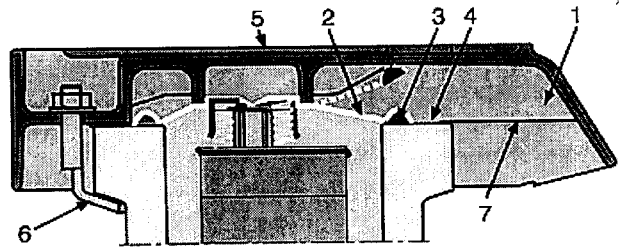
구가 열리면서 팽창된 개스는 외부로 방출되고 Vant는 닫힌다.

아래 그림 2는 Pressure relief 기능을 갖는 Hollow insulator (원통형 절연물)형 Post station 피뢰기이며 그림 3은 Pressure relief vant(압력완화 출구)의 구조를 나타낸 것이다.

3. 기밀구조

3.1. 너클(Knuckle) 구조의 전극

폴리머 피뢰기의 전극 기밀구조(airtight structure)를 위한 knuckle 형상 설계와 FRP tube를 접합시킬 때 기계적으로 충분한 강도를 유지하도록 하는 것은 1차적으로 외부와의 기밀에 우선이 된다. Filament winding시 상·하부 전극의 너클 각도는 와인딩 패턴의 각도를 결정하고 내압 및 인장 강도에 큰 영향을 미치므로 충분히 고려할 필요가 있다. 이와 같은 특성은 피뢰기의 수명과 폭발에 따른 위험 요소를 결정하는 중요한 사항이다. 특히 전극의 너클 설계는 기밀특성을 향상하기 위해 중요하며, 너클 구조 각도는 와인딩 작업성 및 기밀구조를 유지하기 위해 45°가 적당한 것으로 알려져 있다. 이것은 와인딩의 작업 공정과 너링(knurling)문제점을 해결하는데 영향을 미칠뿐만 아니라 와인딩시 전극 끝의 테두리 와인딩(hoop winding) 부분과 면적 또한 너링상태로 될 가능성을 제거하는데 목적이 있다. 상부, 하부전극은 와인딩(winding) 작업시 전극 부분에서 흡습 및 기밀구조를 유지하기 위하여 상, 하부전극의 외부 표면에 너링을 부여하여 와인딩에 의한 접촉을 용이하게 한다. 그림 4는 너클 형상의 전극구조를 나타낸 것이다. 함침 수지는 와인딩수지의 경화온도와 발열온도의 내열성과 소자의 적층에 대



- 1. Venting duct
- 2. Sealing plate.
- 3. Rubber gasket
- 4. Bedding
- 5. Flange
- 6. Padded clamp
- 7. Indicating plate

그림 3. Pressure relief 기능을 위한 vanting 구조

한 내부섬락의 절연성을 고려하였다. 사용한 유리섬유(glass mat)는 절연성을 고려하여 E-glass를 사용하였으며, 에폭시수지를 함침시킨 프리프레그(prepreg)의 두께는 0.18mm로 3 플라이(ply)로 겹쳐 0.54mm의 절연관(cylinder)을 제조하였다. 프리프레그의 유리섬유 함유량(glass content)은 64%로

하여 절연관 표면 기공이나 작은 천공 구멍(pin hole)이 발생할 수 있기 때문에 중요하게 고려되어야 한다.

3.2. 접촉저항과 열팽창 특성

폴리머 피뢰기는 필라멘트 와인딩으로 “-” 접촉요소(convex disk :Al collector)는 “+” 접촉요소

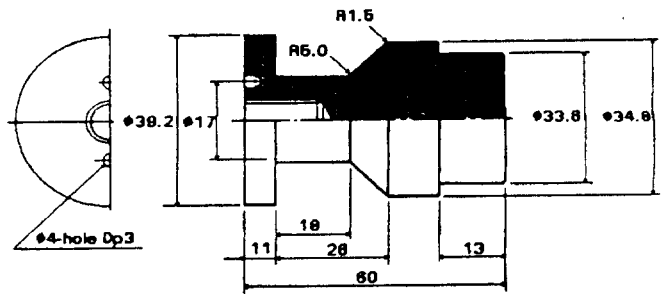


그림 4. Knuckle 형상의 전극구조

열팽창 계수가 주위의 전극과 비슷하게 하기 위하여 와인딩시 수지의 함량을 조절할 수 있다. 유리섬유와 수지의 비율 잘못 조절하면 기공률(void content)이 증가

(corned disk)와 접촉하고 “-” 접촉 요소는 ZnO 소자와 연결된다. 콘디스는 절연관이 창, 수축 될 때 소자와 전극 사이의 접촉저항을 낮추며, 소자 사이의 접촉을 용이

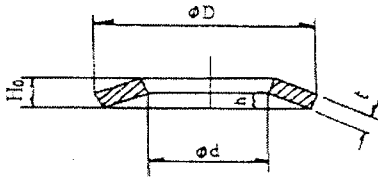


그림 5. 폴리머 피뢰기 corned disk의 형상

표 2. 고분자 피뢰기를 위한 corned disk의 특성

Inner diameter(d)		Outer diameter(D)		Thickness(t)		Height(H ₀)	
기준치	허용차	기준치	허용차	기준치	허용차	기준치	허용차
4.2	+0.2	28	-0.25	1	±0.04	1.8	±0.15

하게 하기 위해 사용된다. 또한 콘디스크는 소자 및 전극의 온도 변화나 FRP 절연관의 팽창, 수축에 견디는 일정한 내하중을 유지해야 하기 때문에 폴리머 피뢰기에서 대단히 중요한 구성 요소중의 하나이다. 콘디스크의 형상은 그림 5와 같으며, 특성은 표 2와 같다.

피뢰기 내부에서 접촉 저항과 내구성에 직접적으로 영향을 미치는 콘디스크는 스프링 강제에 은도금을 하며 열팽창에 의하여 팽창, 수축될 때 ZnO 소자와 전극 사이의 접촉 저항을 낮게 유지하는 것이 목적이다. 그림 6은 콘디스크의 의 30~200kg·f까지 하중과 변위($\Delta mm=0.813$)를 측정 한 결과이다. $813(\Delta mm^3)$ 의 변위에 대하여 하중은 200kg·f 정도가 작용하므로 폴리머 피뢰기의 구조상 절연관 길이 단위에서 400kg·f의 하중과 1.6mm의 팽창, 수축을 감당할 수 있을 것으로 나타나며 이러한 변위 허용치를 초과할 경우 콘디스크를 1~2개 추가하여 보완할 수 있다. 따라서 소자의 발열로 인한 FRP 절연관의 열팽창 계수를 유사하게 고려할 수 있다.

일반적인 콘디스크의 재질은 S-K5종의 스프링용 강재를 사용하기 때문에 실제로 폴리머 피뢰기에 전압이 인가되었을 경우 전극과 소자 사이의 접촉저항이 상당히 커지므로 접촉 부위에서의 열과 전도도를 고려해야만 한다.

FRP 절연관 내부의 ZnO소자와 캡(cap)단자 사이에 접촉저항을 줄이고 FRP 절연관의 열팽창 및 수축에 의한 소자와 소자사이, 소자와 캡 단자 사이에 견고한 접촉상태의 유지를 위하여 콘디스크를 상, 하부전극에 설치된다. 사용한 corned disk의 성분을 표 3에 나타내었다. Al collector(convex disk)의 재질은 디스크의 압력에 의한 강도와 접촉저항 완화를 위한 전도도가 요구되는 것으로 그림 7의 형상과 같이 설계가 가능하다.

와인딩 공정은 축방향으로 가압 유지(corned disk의 특성)하여 경화 과정에서 회전시키면서 경화하는 것으로 와인딩 후 Al 전극과의 이탈을 방지하기 위하여 전극 테두리 처리 및 와인딩 각도를 고려한다. Al 전극과 FRP 절연관의 너클 각도는 45~90° 범위를 선택하나 폴리머 피뢰기의 경우 45°를 유지시

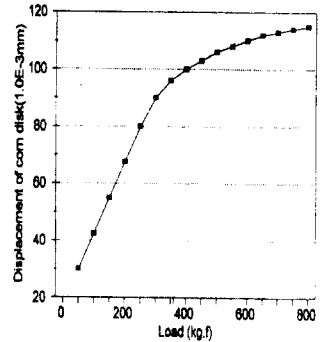


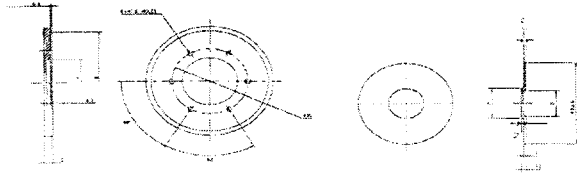
그림 6. 콘디스크의 load와 변위

표 3. 콘디스크의 성분

성분	조성
C	0.8-0.9
Si	0.35
Mn	0.5
P	0.03
Sn	0.03
Cu	0.25
Ni	0.25
Cr	0.3

켜 너클 부분의 knuckle 부분의 전극에 테두리 와인딩을 하여 FRP 절연관의 끝에 대한 접촉성능을 개선시키다.

그림 8은 와인딩된 너클 구조의 전극을 모든 부분을 나타낸 것으로 인접사선(- · - · -)은 FRP 와인딩한 부분이고 외부(XXX)는 절연 하우징으로 사용되는 실리콘 고무 복합소재이다. 이러한 기밀 구조는 폴리머 피뢰기에서 가능한 장점이기도 하며 기존의 자기에 관을 사용한 피뢰기에서는 내부싱에 의한 흡습 사고 원인으로 큰 문제점으로 인식되고 있다. 너클 전극과 와인딩으로 이루어진 폴리머 피뢰기의 하우징을 적용할 것



(a) Conceve disk

(b) Convex disk

그림 7. 폴리머 피뢰기의 conceve 디스크와 convex 디스크

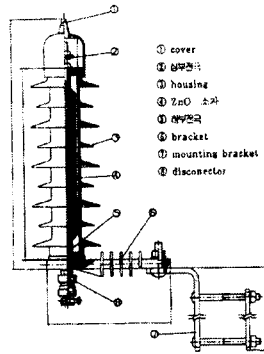
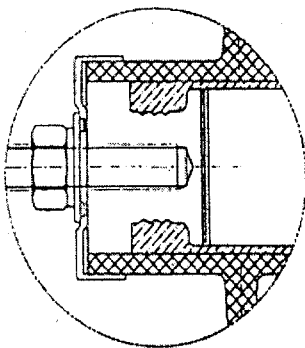


그림 8. FRP 부분 전체의 knuckle 구조 그림 9. 폴리머 피뢰기의 Assembly

우에도 전극으로 부터의 기밀구조는 대단히 중요 하기 때문에 신중한 설계가 필요하다.

Al 전극과 FRP 절연 하우징 계면은 외부의 열 및 기계적인 스트레스에 취약하기 때문에 수축과 팽창을 반복하면 틈이 생기게 되고 기중의 수분이나 강우에 의한 흡습 현상이 나타나 내부 하우징 연면 방전과 ZnO 소자의 연면 절연 파괴에 의한 써지 흡수 기능 상실 등으로 이어지기 때문에 피뢰기의 고장을 유발하게 된다. 이와 같이 폴리머 피뢰기를 사용함으로써 나타나는 단점을 개선하기 위하여 열팽창계수가 같은 sealant를 사용 와인딩하기도 한다. 외부 절연 하우징으로 사용되는 소재는 실리콘이나 EPDM, EPR 등으로 옥외 환경에 적합한 고무 복합소재이

다.

ZnO 소자를 수납한 FRP 절연관과 외부 고무하우징은 Al 전극과 FRP, 하우징, 캡, 터미널 단자가 만나는 취약 부위으로써 피뢰기 사고의 대부분이 여기에서 일어나는 것으로 나타나고 있다.

이러한 취약 부위 해결을 위해 폴리머 피뢰기는 Al 전극과 내·외부 하우징의 기밀구조로써 전극과 만나는 턱이진 이중 재질 하우징의 계면접촉 등의 단점을 개선하기 위하여 열팽창계수가 유사하고 방식이 되는 접착제를 사용하기도 한다. 전극 부위에서는 기계적인 변위에 대해 완충 가능한 설계를 하기도 하는데 이런 경우는 Al 전극과 하우징이 만나는 부위에 턱이진 이중계면에서 housing의 수축 팽창에 대한 barrier 역할을 함으로써 피뢰기의 고장 유발의 원인을 줄이게되는 것이다.

표 5. 고분자 및 자기 애관형 피뢰기의 특성 비교

종류	Polymer type arrester	Porcelain type arrester
특징		
기계적 특성 및 작업성	- 유연성과 내충격성 특성 - 운반, 작업중에 발생할 수 있는 충격에 의해서도 안정성	- 자기 제품 몸체의 제한성과 충격에 약하다
중량	- 기존 자기 제품에 비해 약 1/3의 중량으로 제조 가능	- 고무 제품에 비해 중량감이 있기 때문에 작업에 불편하다
가격	- 제조과정은 복잡하고 약간 비싸지만 운반, 취급이 용이 - 낙뢰에 대해 아크 형성시 폭발에 의한 비산 가능성 없음	- 낙뢰에 대해 파워 아크 형성시 폭발에 의한 파편 비산 가능성으로 주변품 손상 및 기타 위험 요소를 내포
성능	- 고강도 표현이 가능하고 자기소재로서의 문제점인 내부로의 수분 흡수에 대한 가능성에 대해서 보다 안정	- 내부로의 수분 흡습 가능성 내포

그림 9는 피라멘트 와인딩을 위해서 설계된 너클 전극을 사용하여 FRP 내부 절연관에 ZnO 소자를 수납하고 와인딩된 폴리머 피뢰기로서 상부 캡단자와 브래킷이 저립된 완성품의 형태를 나타내고 있는 것이다.

표 5는 요즈음 개발되는 폴리머 피뢰기와 기존의 자기 애관을 갖고 있는 피뢰기의 특성을 비교하여 나타낸 것으로 폴리머 피뢰기의 경우 기계적 충격과 내오손 특성, 중량에 따른 작업성 등에서 우수한 것으로 풀이되고 있다.

4. 결 론

피뢰기 설계시 중요한 요소로써 사고의 원인을 무시할수 없다. 대부분의 피뢰기 고장 원인은 수분 침투로 인하여 내부의 연면 절연 파괴와 ZnO 소자의 열화로 인한 이상전압의 유입시 작동 불능 및 폭발 등으로 알려져 있으며 이것은 수분에 대한 기밀처리에 있어서 성능개선이 요구되고 있다.

또한 고분자 피뢰기는 가장 중요한 흡습에 대한 완벽한 기밀구

조와 형상(housing) 설계의 자유도가 크기 때문에 내오손성능을 향상시킬 수 있으며, 고장시에 이상전압 유입에 의해 폭발하여도 파편이 비산하지 않으며 초기 설계에 있어서 압력 완화에 대한 방압 개소와 방압 요소를 쉽게 설정할 수 있다. 이러한 장점으로 미루어 요즈음 배전용뿐만 아니라 송전용, 그밖에도 여러 분야의 전력기기용으로 많은 관심을 가지고 개발중이다.

참 고 문 헌

[1] R S Gorur, "Electrical Performance of Polymer Housed Zinc Oxide Arrester under Contaminated Conditions", IEEE PWRD, 1990.
 [2] Stanislaw M Gubanski, "Wettability of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators", IEEE PWRD, July, 1990.
 [3] B. F. Hampton "Flashover Mechanism of Pollute Insula-

tion", Proc. IEE, Vol. 111, No. 5, May, p. 985-998, 1964.
 [4] Kazuyuki Kusumoto, Hirokazu Teraszka, Minoru Murano, Munetsugu Kojima, "Gapless Surge Arresters for Electric Power Systems", TOSIBA Review, 34(2), 1979.
 [5] Hirokazu Teraszka, Koichi Arai, Soji Kojima, Mzuho Yamashita, Takashi Sasaki, Takatugu Yamaya, "Gapless Surge Arresters for Shinkansen Electric Coaches of Japanese National Railways", TOSIBA Review, 34(2), 1979.
 [6] Masataka Kimata, Kimiharu Watabiki, Takahi Sasaki, Hiroshi Oka, "Gapless Surge Arresters for Rolling Stock", TOSIBA Review, 39(8), 1984.
 [7] Albert Mayer, "Overvoltage protection for AC traction power supplies and vehicles", ABB Review 3, 1994.
 [8] 日本電氣學會技術報告, "酸化亞鉛素子の 新適用技術動向", 579호, 1996(2).

< 조한구 박사 >