

폴리머 애자의 특성과 한전 배전선로 적용사례

- EPDM을 중심으로 -

이 철 호

평일산업(주) 기술연구소장/공학박사

1. 머리말

1970년대 초부터 미국을 중심으로 기존의 자기 애자를 대체하여 폴리머 애자를 사용하게 되었고, 국내에서는 배전선로에 사용함으로써 그 우수성과 경제성이 인정되어 사용량이 급격히 증가하였으며, 현재 전력계통 절연의 중심 역할을 하고 있다.

국내 유일의 전력회사인 한전은 폴리머 애자를 1990년대 초반부터 외자로 도입하여 배전선로에 사용하기 시작하였으며 국산품은 1997년 시사용품을 시작으로 2000년도부터 본격적으로 확대 사용하기 시작하였고 현재까지 약 220만개 이상의 애자가 설치되어 있다. 220만개 수량의 대부분은 평일산업에서 공급하였으며 설치된 지 7년이 지난 현재까지 한건의 사고도 발생하지 않아 우수한 특성과 내구성을 입증하고 있다.

평일산업은 1990년대 초부터 폴리머 애자를 개발하기 시작하였으며, 1996년에는 폴리머 애자용 EPDM(에틸렌 프로필렌 디엔 삼원공중합체) 컴파운드 국산화, 1998년 FRP 코아의 국산화에 각각 성공하여 제조기술을 포함한 폴리머 애자의 진정한 100% 국산화를 이룩하였다.

폴리머 재료는 개발 당시의 조성으로 그대로 사용되는 것이 아니라 계속 향상되고 개선되어야 한다. 따라서 개발 초기의 재료보다 현재의 재료는 훨씬 더 우수한 성능을 갖고 있으며 이에 따라 장기사용에 따른 신뢰성도 점차 향상되고 있다.

본고에서는 폴리머 애자에 요구되는 특성과 이에 대한 검증 시험, 설계 및 제조시의 중요한 주안점 및 폴리머 재료에 대하여 종합적으로 고찰하였다. 특히

요즈음 관심의 대상이 되고 있는 EPDM과 실리콘의 특성 비교 등을 통하여 중요한 기재재인 폴리머 애자에 대한 기술적 판단 자료를 제공하고자 한다.

2. 폴리머 애자의 구조와 성능

자기 애자는 절연능력이 우수하고 완벽한 무기물이므로 자외선이나 불꽃방전에 의한 표면 열화는 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있어서 전기 절연물로서 주종을 이루어 왔다. 그러나 깨지기 쉽고 무거우며 표면에 부착되는 오손물과 수분의 영향으로 섬락 현상이 쉽게 발생하는 단점으로 신소재 출현을 촉발하게 되었으며 이에 화답한 재료가 폴리머이다. 폴리머로 제조하는 애자를 처음으로 시도한 회사는 미국의 GE사로서 1950년대 에폭시 재질의 폴리머 애자를 개발하여 사용하였으나 표면 열화로 실패하였다.⁽¹⁾

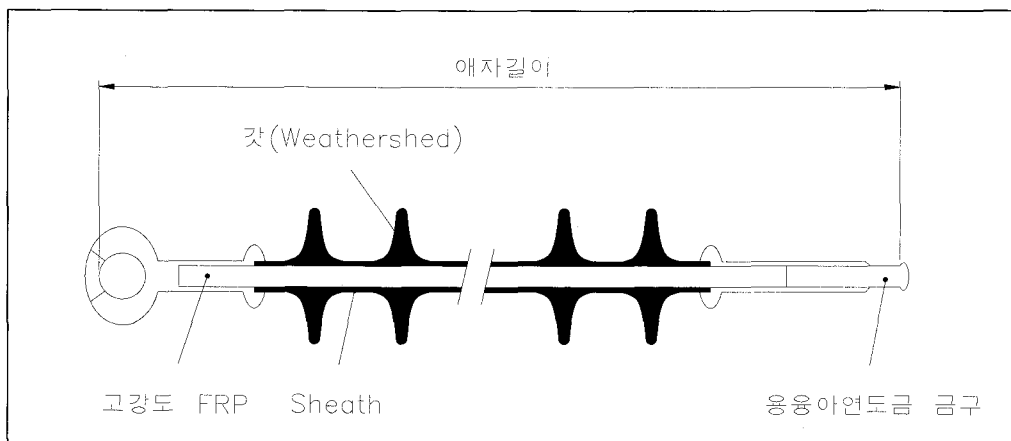
폴리머는 깨지지 않고 내오손 성능을 포함한 절연성능도 우수하지만, 유기물이므로 태양광으로부터의 자외선에 의한 열화와 오손물과 수분의 영향으로 발생하는 불꽃방전에 의해 폴리머 절연재료가 탄화되는 트래킹 현상을

극복하는 것이 해결 과제였다. 1950년대 후반 수산화알루미늄이라는 첨가제가 내트래킹성에 효과적이라는 것이 알려지면서 폴리머 재료 연구가 가속되었고 내후성 문제도 해결되면서 1960년대의 송전급 폴리머 애자 개발 단계와 시사용을 거쳐서 1970년대부터는 본격적으로 송전급 폴리머 애자가 생산되기 시작하였다. 이후 지속적인 재료 연구로 폴리머의 취약점인 내후성과 내트래킹성의 특성이 급격히 향상되어 현재는 재료 개선과 함께 여러 평가 기법이 개발되어 그 신뢰성을 입증하고 있다.

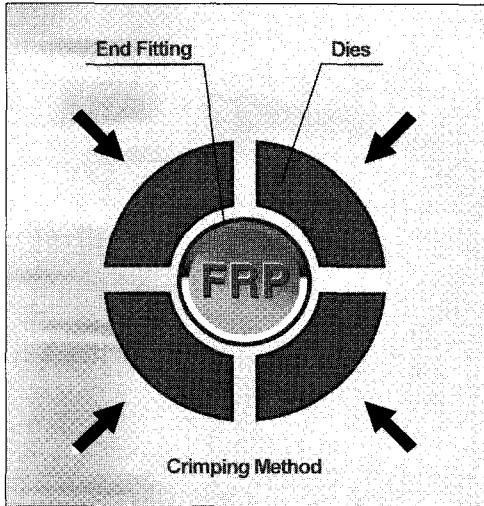
가. 폴리머 애자의 구조

실패와 연구를 계속하고 시간이 지나면서 자연스럽게 이상적인 폴리머 애자의 형상이 결정되었으며 그림 1에 일반적인 폴리머 애자의 형상을 나타내었다. 폴리머 애자는 지지애자(Line Post 애자), 철도용 장간애자 등 여러 형태가 있으나 그림 1은 현수애자의 개념도이다.

고강도 FRP rod를 기본 축으로 하고, 그 위에 절연성을 위한 갓(shed)이 씌워져 있으며 양단에 연결금구가 부착되어 있으므로 기본 개념은 매우 간단하지만 동시에 주의 깊은 설계가 요구된다. 그림 2에 FRP 코어를 중심으



〈그림 1〉 폴리머 애자의 구조 (현수애자)



〈그림 2〉 금구와 FRP 코아의 압착과정

로 금구가 압착되는 과정을 설명하는 그림을 나타내었다.

시멘트를 사용하여 자기재 절연물을 연결금구와 접착하는 기존의 자기재 애자와는 달리 폴리머 애자는 기계적 강도를 유지하기 위하여 유리섬유 강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastics, FRP)을 내부 코아 재질로 사용하고 있다. 이러한 FRP는 금속보다 훨씬 가벼우면서 우수한 인장특성을 나타내므로 여러 가지 종류의 폴리머 애자에 매우 유용하게 사용되고 있다. 그러나 옥외고전압 절연물로서 FRP 코아만으로 절연특성을 유지하기에는 내오손성, 습기의 침투, 트래킹 발생 등의 원인으로 적합하지 않으므로 고무와 같은 갖을 FRP 위에 성형 가공하여 표면 누설거리를 늘려주고 절연성능을 보장해 주게 되며 FRP 코아는 실제로 외부 표면에 노출되지 않는 것이다. 또한 FRP 코아 양단에 압착 등에 의한 방법으로 금구가 연결되어 있으며 이 금구는 일반적으로 주물에 용융아연도금을 하여 사용하거나 배전급의 경우 알루미늄 재질을 사용하는 제품도 나와 있다.

개발초기의 갖은 누설거리를 늘려주기 위해 기존의 자기재 애자의 형상대로 설계되었으나 금형으로부터의 탈

형성 등이 문제가 되어 점차 현재와 같은 디스크 형태로 개선되었으며 직경이 가는 FRP 코아 덕분에 누설전류가 자연적으로 길어지게 되어 충분한 절연설계가 가능하게 되었다.

한편, 양단의 금구 연결부분에서의 방수, 기밀처리(end seal)는 폴리머 애자의 설계에 있어서 가장 중요한 요인 중 하나이다. 방수처리가 잘못되어 FRP 코아가 대기 중의 공해나 수분과 직접 접촉하게 되면 트래킹이나 절연과 피로 이어지게 되어 애자의 수명에 결정적인 영향을 미치게 되므로 코아와 금구 사이에 접착제로 처리를 하여 압착하고 최종제품의 금구와 하우징 경계면에 다시 실란트 등으로 밀봉하는 방법이 널리 사용되고 있다.

국내에서 폴리머 애자에 대한 사용이 급증하면서 송전급 애자를 중심으로 산불에 대한 우려가 일부 있는 것이 현실이다. 폴리머 애자는 유기물이므로 불에 타기 쉬워 산악 지대가 많은 우리나라의 실정으로 볼 때 위험하다는 인식이다. 자기애자는 포틀랜드 시멘트로 자기와 금구를 접착하는데 비해, 폴리머 애자는 FRP 코아를 중심으로 금구를 압착하여 그 강도를 유지하는 방식이다. 그런데 코아의 재질인 FRP는 유리 섬유 함량이 약 80% 정도로서 애자의 하중을 유지하고 있다. 유리섬유는 용융온도 800℃ 이상의 무기물이며 용융온도가 가공 전선인 알루미늄의 660℃보다 높음으로, 만약 산불이 발생하면 애자보다는 전선에 문제가 발생한다는 것을 알 수 있다.

또한 산불의 급격한 고온이 가해질 때, 기존 자기 애자는 자기와 금구와의 선폽창계수의 차이로 인하여 계면 탈리 현상이 발생하여 애관의 갈라짐 등 파손의 위험이 있지만 폴리머 애자는 뛰어난 유연성으로 이를 극복할 수 있다. 세계적으로도 산불에 대한 폴리머 애자의 신뢰성이 의심된 적이 없으며, 신규 설치되는 선로의 80% 이상을 폴리머 애자로 채택하고 있는 미주 지역에서 산불에 대한 문제 발생이 전혀 없는 것도 이를 반증하는 사례이다.

나. 폴리머 애자의 기본특성

폴리머 애자의 기본적인 특성은 전기적 성능 및 기계적 성능으로 크게 나눌 수 있으며 그 특성을 간략하게 설명하기로 한다.

(1) 전기적 특성

가장 기본적인 특성인 상용주파전압 시험은 교류전압에 대한 절연강도와 장기 사용 중의 안전을 검증하기 위해 사용되며 폴리머 애자의 형상 및 치수에 의해 결정된다. 이 특성은 건조섬락거리 및 누설거리에 관련되는 특성으로서 섬락거리가 길어지면 증가하게 된다. 장기 사용 시 표면의 오손물질로 누설전류가 흐르고 이 열로 국부적인 건조대가 형성되면 이 곳에 아크가 발생하고 이 아크로 주위의 공기가 이온화되면서 저항이 감소하므로 상용주파섬락전압이 낮아진다. 따라서 섬락거리 뿐 아니고 누설거리에도 좌우되며 특히 주수 시험 값은 누설거리 및 오손 정도에 영향을 받는다.

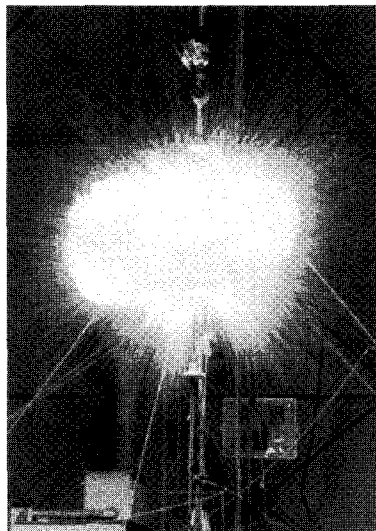
뇌충격섬락전압 특성은 번개 등으로 인한 과도적인 이상 전압에 대한 검증 시험으로서 건조섬락거리에만 영향을 받으므로 장기 사용에 따른 오손물질의 축적과는 크게 관계가 없다. 전파장해전압(RIV) 시험은 라디오 소음 및 잡음 측정으로서 물방울 또는 금구 사이의 스파크로부터 기인한다.⁽²⁾ 일반적으로 라디오 주파수 대역인 1MHz에서 측정하며 발수성이 우수한 폴리머 애자가 자기 애자보다 우수한 특성을 나타낸다. 폴리머 애자에 있어서 중요하고 또 어려운 시험인 파워아크(내아크) 시험

은 단락 사고시의 폴리머 애자의 파손 여부를 평가하는 시험이다(그림 3, 4 참조).

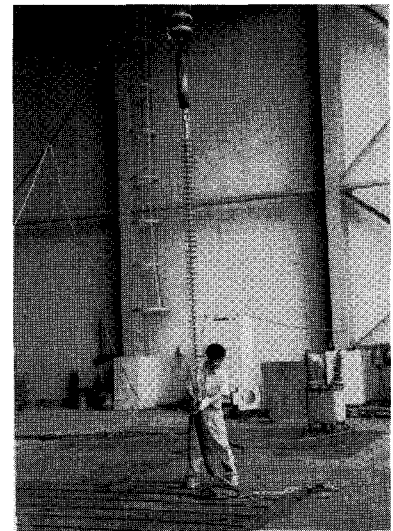
가공 선로에서 뇌 등의 과전압과 오손 또는 조류 분비물에 의해 애자에 섬락 사고가 발생하면 계통의 단락전류가 계속하여 흐르기 때문에 kA 수준의 대전류가 흐르며 이 때 순간적으로 수 천도에 이르는 고온이 된다. 이러한 조건을 모의하기 위하여 일반적으로 규정인장하중의 20% 하중과 함께 150kA·cycle의 조건을 인가하여 시험하고 시험 후 금구가 이탈되지 않아야 하고 하우징에 균열이 발생하거나 코아가 노출되면 안된다.

(2) 기계적 특성

가장 기본적인 인장 파괴하중을 폴리머 애자에서는 규정인장하중이라 하며 전력회사가 요구하고 제조자가 보증하는 수치로 결정된다. 폴리머 애자는 FRP 코아의 높은 인장강도와 금구와의 압착 등에 의한 결합으로 유지되므로 자기 애자에 비교하여 금구의 직경이 훨씬 작아도



〈그림 3〉 파워아크 시험 장면



〈그림 4〉 345kV 폴리머 애자의 파워아크 설치 장면(평일산업 제품)

되며 그에 따라 무게가 가벼워지는 특징이 있다.

다. 폴리머 애자의 성능평가

폴리머 애자는 기존의 자기 애자와는 구조적으로 차이점이 있으므로 폴리머 애자에 적합한 시험방법 및 기준이 개발되어 있다.

세계적으로 인정되고 있는 시험 규격으로는 IEC 61109⁽³⁾, ANSI 29.11, 29.13⁽⁴⁾, CEA LWIWG-01⁽⁵⁾, 02, IEEE 1024⁽⁶⁾ 등이 있으며 국내의 규격으로는 한전의 구매시방서⁽⁷⁾ 및 철도청 구매규격 등이 있다. 이러한 시험 방법들은 폴리머 애자에서 발생할 수 있는 문제점을 평가하는데 상당히 유효하며, 실제로 규격에서 요구하는 모든 시험 항목을 통과하는 제품을 현장에서 사용하면 가혹한 환경에서도 큰 문제점이 없는 것으로 평가되고 있다.

한전의 구매시방서는 CEA LWIWG-01 및 IEC 61109를 근간으로 하여 일부 항목을 추가하였으며, 여기서는 IEC 61109 규격을 중심으로 각 시험 항목별 평가 방법 및 요구 특성을 설명하기로 한다. 외국 규격은 설계시험 (design test), 형식시험(type test), 발체시험(sample test) 및 검수시험(routine test)으로 크게 구분되어 있다.

(1) 설계시험(Design test)

설계시험은 폴리머 애자의 설계, 재질과 제조방법의 적합성을 확인하기 위한 시험이다. 금구의 접합과 계면평가 시험은 양쪽 금구의 접합 및 밀봉 상태를 확인하는 시험이다. 세 개의 시료에 대하여 -20℃의 온도에서 규정인장하중의 30% 하중에서 갑자기 하중을 제거하는 급하중 해제시험을 실시하며 이어서 규정인장하중의 50%의 하중을 준 상태에서 -35℃와 +50℃를 96시간 반복하는 열적-기계적 시험을 거치고 연속해서 소금물에 42시간 끓인 후 급준파 시험을 하고 상용주파건조섬락 전압 시험과 내전압 시험으로 애자의 상태를 확인한다.

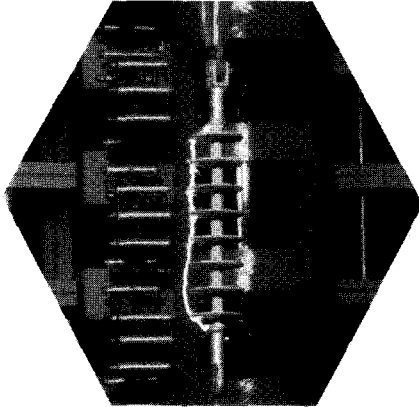
만약 금구와의 밀봉 상태가 조금이라도 이상이 있으면 소금물에 끓일 때 소금물이 애자 내부로 침투하여 준도 1000kV/μs의 급준파 충격전압 시험에서 내부 관통파괴가 발생할 것이다. 따라서 이러한 시험을 거쳐 양호한 결과가 얻어지면 현장에서 실제 사용시 가장 가혹한 상태에서도 수분 침투에 의한 사고가 없음을 입증하는 것이다. 그 다음으로 코아의 기계적 수명을 예측하는 시험이 기계적 하중-시간 시험이다.

평균파괴하중의 60%까지 인장 하중을 가한 후 96시간을 유지하여 코아가 빠지거나 파괴되지 않을 것이 기준이다. IEC 61109의 부속서에 보면 이에 대한 이론적 근거가 자세히 나와 있다. 즉 이렇게 시험하여 이상이 없으면 50년 연속 사용 후에도 일상하중에서는 이상이 없음을 입증하는 시험이다. 하우징의 내트래킹 시험은 소금물을 안개 상태로 분무하면서 누설거리/34.6kV의 전압을 1,000시간 인가하면서 섬락이 3회 이하이어야 하며, 트래킹 발생이 없고 내부 FRP 코아가 외부로 노출되지 않아야 하며 갓에 구멍이 나지 않아야 한다. 한전 구매시방서에는 위의 시험 대신 트래킹 휠 시험으로 내트래킹성을 평가하도록 되어 있다.

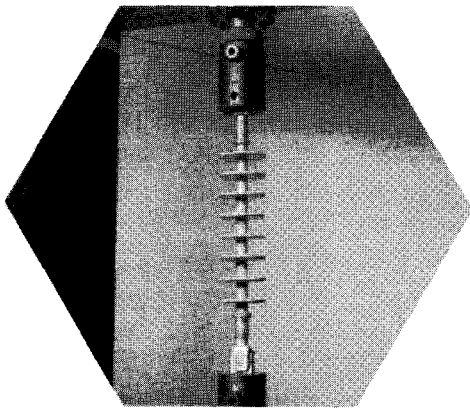
4개의 시료를 서로 수직 방향으로 소금물에 담그고 누설거리 당 35V의 전압을 40초간 인가(누설거리 760mm 이면 26.6kV)하는 순서로 시료 1개당 30,000 사이클을 계속하여 트래킹이 없어야 한다. 내부 코아에 대하여는 코아 시료를 흑신 용액에 담가 염료가 위쪽까지 침투하는지를 평가하는 수분침투 시험과 코아 시료를 소금물에 끓인 후 12kV 전압에 견디는지를 확인하는 수분침투 시험이 있다. 앞의 나. 절에서 설명한 파워아크 시험도 설계시험의 일종이다.

(2) 형식시험(Type test)

애자의 전기적인 형식은 아크거리, 누설거리, 갓의 경



〈그림 5〉 뇌충격섬락전압 시험장면



〈그림 6〉 기계적 하중-시간 시험장면

사도와 직경 및 갭과의 거리 등에 의해 결정되며 뇌충격 전조내전압, 상용주파주수섬락전압, 주수개폐충격내전압 등을 시험한다. 기계적인 형식은 코아의 지름과 금구의 압착방식에 의해 결정되며 기계적 하중-시간 시험으로 평가한다. 규정인장하중의 70% 하중에서 96시간 유지한 후 규정인장하중에서 견디는지를 확인한다(그림 5, 6 참조).

(3) 발취시험(Sample test)

전체 수량에서 샘플링하여 제조 과정에서의 품질관리

를 시험하는 성격으로서 치수를 검사하고 규정인장하중을 확인하며 금구의 아연도금 부착량 및 균일성능을 시험한다.

(4) 검수시험(Routine test)

제조 과정에서의 결함을 제거하기 위하여 제조업체에서 모든 폴리머 애자에 대하여 전량시험으로 행하며 육안 검사 및 규정인장하중의 50% 하중을 10초간 인가하여 결합 여부를 확인한다.

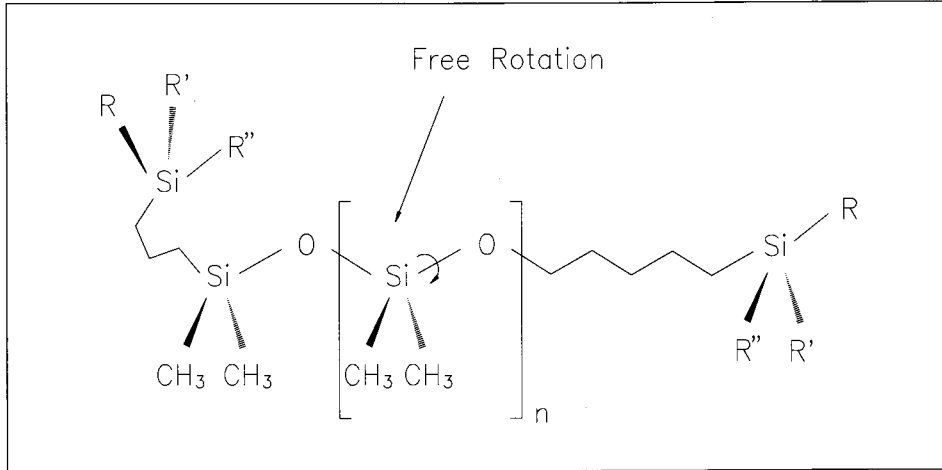
3. 하우징 재료 - EPDM과 실리콘

1960년대 폴리머 애자의 개발 초기에 사용이 검토되었던 고분자 재료로는 테프론, 에폭시 수지, 폴리에틸렌, 상온경화용(RTV) 실리콘 고무, 고온경화용(HTV) 실리콘 고무, EPDM, EPDM/silicone alloy, EVA, 폴리우레탄 등 여러 가지였으나 내후성과 내트래킹성, 성형가공성 및 가격 등의 이유로 현재는 EPDM과 실리콘 고무 및 EPDM/silicone alloy 등이 주로 사용되고 있다.

가. EPDM

ASTM D1418의 용어의 정의에 따르면 EPDM (Ethylene Propylene Diene Terpolymer)이란 ethylene ("E")과 propylene("P") 및 가황을 위한 제3성분인 diene("D")이 불규칙적으로 결합된 무정형의 고무를 말하며, 여기서 "M"은 고분자 주쇄가 불포화기가 없는 methylene("M")으로 이루어진 것을 의미한다.

EPM(copolymer of ethylene and propylene)은 이중 결합이 없어서 황가황이 불가능하며 EPDM은 과산화물 가교와 황가황이 가능하다. 일반적으로 EPM과 EPDM을 포함하여 EPR(ethylene propylene rubber) 또는 EP rubber라고 부른다. 주쇄가 포화되어 있다는 것이 EPDM



〈그림 8〉 실리콘(Poly Di-Methyl Siloxane, PDMS)의 화학구조

롭게 회전하는 특성을 갖고 있으므로 넓은 범위의 온도에서 유연한 특징을 나타내고 있다. 이러한 특징으로 분자구조가 매끄럽기 때문에 인장강도, 인열강도, 마모강도 등의 물리적 성질은 EPDM보다 낮다.

화학구조 주쇄의 Si에 결합되어 있는 유기기 때문에 완전한 무기고분자라고 하기는 어려우며, 무기 고분자이므로 열화하지 않는다는 이론도 성립되지 않는다. 물을 반발하는 발수성은 실리콘의 주쇄인 Si에 기인하는 것이 아니라 Si와 결합되어 주쇄를 둘러싸고 있는 메틸(methyl)기 등의 유기기 때문이다. 요약하면 실리콘의 주쇄인 Si-O 결합에너지가 커서 내후성 및 내열성이 우수하게 되고 Si 주위를 둘러싸고 있는 유기기로 인하여 발수성을 나타내게 되는 것이다.

실리콘은 EPDM과 유사하게 톨루엔, 가솔린, 광유, 절연유 등과 같은 비극성용매와 용해도지수가 비슷하여 쉽게 용해하므로 사용시 주의를 요한다. 그러나 EPDM과 달리 Si-O 결합이 산, 염기 등의 공격에 쉽게 깨지므로 산, 알칼리에 약하다는 단점을 갖고 있다. 실리콘은 또한 EPDM보다 물을 흡수하는 흡수율이 10배 정도 크다.^(11~13)

다. EPDM과 실리콘 컴파운드

앞에서 설명한 순수한 EPDM과 실리콘만으로는 필요한 물성을 만족하지 못하므로 실제 제품에는 그대로 사용할 수 없다. 절연물 등의 실 제품에 적용하기 위해서는 순수한 EPDM이나 실리콘을 기본으로 하고 여기에 필러(filler), oil, 산화금속, 가교제, 가교조제, 산화방지제 등의 각종 첨가제를 혼합하여야 한다.

이와 같이 각종 첨가제가 혼합되어 성형되기 전의 재료 상태를 컴파운드(compound)라 하고 순수한 EPDM이나 실리콘은 기저고분자(base polymer)라 한다. 즉, 폴리머 애자에 관련되어 일상적으로 부르는 용어인 EPDM이나 실리콘은 EPDM 컴파운드 또는 실리콘 컴파운드라고 해야 정확한 표현이 되는 것이다. 이러한 컴파운드는 제품 성형 단계에서 고온(150~180℃)과 고압에 의해 가교되어야 실제 적용될 수 있는 최종 제품으로 그 가치를 갖는다.

옥외 절연물 용도의 EPDM 컴파운드의 조성을 살펴보면 EPDM 기저고분자의 양을 100으로 할 때 수산화알루미늄(Aluminum Tri-Hydroxide, ATH)이라고 하는 무기 첨가제가 일반적으로 약 150~200부 첨가된다. 이 수산화

알미늄은 EPDM이나 실리콘 및 에폭시 등의 애자용 절연 재료에서 요구되는 내트래킹성을 갖게 하는 필수적이고 중요한 첨가제이다. 원래는 플라스틱 컴파운드의 난연제로 사용되었으나 트래킹 현상을 방지하는데 탁월한 성질이 있다는 것이 밝혀지면서 폴리머 애자용 원료로 각광받게 되었으며, 이 수산화알미늄이 부여하는 내트래킹성으로 인하여 폴리머 애자가 현재와 같이 널리 사용되게 되었다고 해도 과언이 아니다.

수산화알미늄 외에 가소제, 산화방지제, 가공조제, 가교제, 계면결합제 등의 각종 첨가제가 처방되어 실제로 EPDM 컴파운드에서 순수 EPDM 기저고분자가 차지하는 비율은 약 1/3 정도 밖에는 되지 않는다. 물론 EPDM 기저고분자도 수많은 종류의 것이 있으며 여기에 첨가되는 수산화알미늄 및 기타 첨가제의 종류 및 양이 최종 EPDM 컴파운드의 특성을 좌우하게 된다. 사용되는 첨가제가 극성을 갖고 있으면 컴파운드의 절연내력이나 유전특성이 저하되고 흡수성이 커지며, 금형으로부터의 탈형성을 위하여 가소제가 과하게 첨가되면 내트래킹성이 저하되는 등의 부정적 효과가 나타나므로 모든 첨가제가 균형을 맞추어 사용되어야 한다. 따라서 이러한 컴파운드의 배합 설계 시에는 필요한 전기적 성질, 기계적 물성, 최종 컴파운드의 가격, 혼련성, 가공성, 금형으로부터의 탈형성 등을 종합적으로 고려해야 한다.

실리콘 컴파운드에는 단점인 기계적 특성을 보강하기 위하여 실리카가 기본적으로 포함되며 수산화알미늄 약 120~160부, 가교제, 가교조제, 가소제 등의 첨가제가 조합을 이루어야 한다. 즉, 실리콘이라고 하여도 적합한 기저고분자와 첨가제가 적절하게 처방되어야 폴리머 애자용 재료로서의 사용가치가 있게 되며, 현재 폴리머 애자용으로 세계적으로 인정받고 있는 실리콘 컴파운드가 두세 종류 밖에 되지 않는 이유도 여기에 있는 것이다. EPDM은 가격과 기계적 특성에서 장점을 갖는다. 실리콘

콘에 비하여 쉽게 찢어지지 않아 설치시 안전하고 외물 접촉 및 조류 등에 손상 받지 않는 반면, 실리콘은 내후성과 발수성이 우수하여 섬락 사고가 발생할 가능성이 적다는 점이 장점이나 부드러운 외부의 충격에 찢어지기 쉽다는 것이 단점이다.

다음 표 1에 EPDM과 실리콘 컴파운드의 특성을 정리하여 비교하였다.

〈표 1〉 EPDM과 실리콘 컴파운드의 특성 비교

구 분	EPDM 컴파운드	Silicone 컴파운드
주성분 및 첨가제	<ul style="list-style-type: none"> • EPDM 기저고분자 • 수산화알미늄 (약 150~200부) • 산화방지제 • 경화제 등 	<ul style="list-style-type: none"> • Silicone 기저고분자 • Silica(기계적 강도 보강) • 수산화알미늄 (약 120~160부) • 경화제 등
물 성	<ul style="list-style-type: none"> • 인장강도, 인열강도 大 • 마모강도 大 • 내트래킹성 내식성 大 • 흡수율 小 	<ul style="list-style-type: none"> • 발수성 및 발수성의 회복 大 • 내후성 大

4. 국내 환경에서의 폴리머 애자 사양 검토

가. 폴리머 애자의 성능

폴리머 애자의 품질과 성능에 있어서 어느 부분이 중요하고 우선시 되어야 하는지는 가장 중요하고도 실제적인 것이지만 그 우선순위를 쉽게 정의내리기 어려운 문제이기도 하다. 미국 애리조나 주립대학의 Gorur 교수를 비롯한 폴리머 애자 분야의 전문가들의 의견을 종합하면 다음과 같다.^(14~16)

첫 번째, 가장 중요한 문제는 제조에 있어서의 품질관리라는 것이 공통된 의견이다. 양쪽 금구의 밀봉, FRP 코아와 하우징 사이의 계면에서의 접착력이 완벽하여 수분이 침투하는 것을 방지해야 한다. 이 사항은 수많은 양산 제품에 대하여 검사할 수 있는 방법이 없으므로 제조과정

에서 완벽한 품질관리시스템으로 일정한 제품이 양산되어 나오도록 제조업체가 시행하여야 한다.

두 번째로는, 애자의 형상과 설계이다. 즉, 치수(코아의 직경, 누설거리, 섬락거리 등)와 형상(갓의 간격, 지름, 기울기 등) 및 전계를 제어하는 설계가 중요한 요소이다. 형상과 설계에 대한 검증은 2. 다. 절의 성능에서 설명한 바와 같이 규격에서 정한 시험 방법으로 충분히 입증 가능하다.

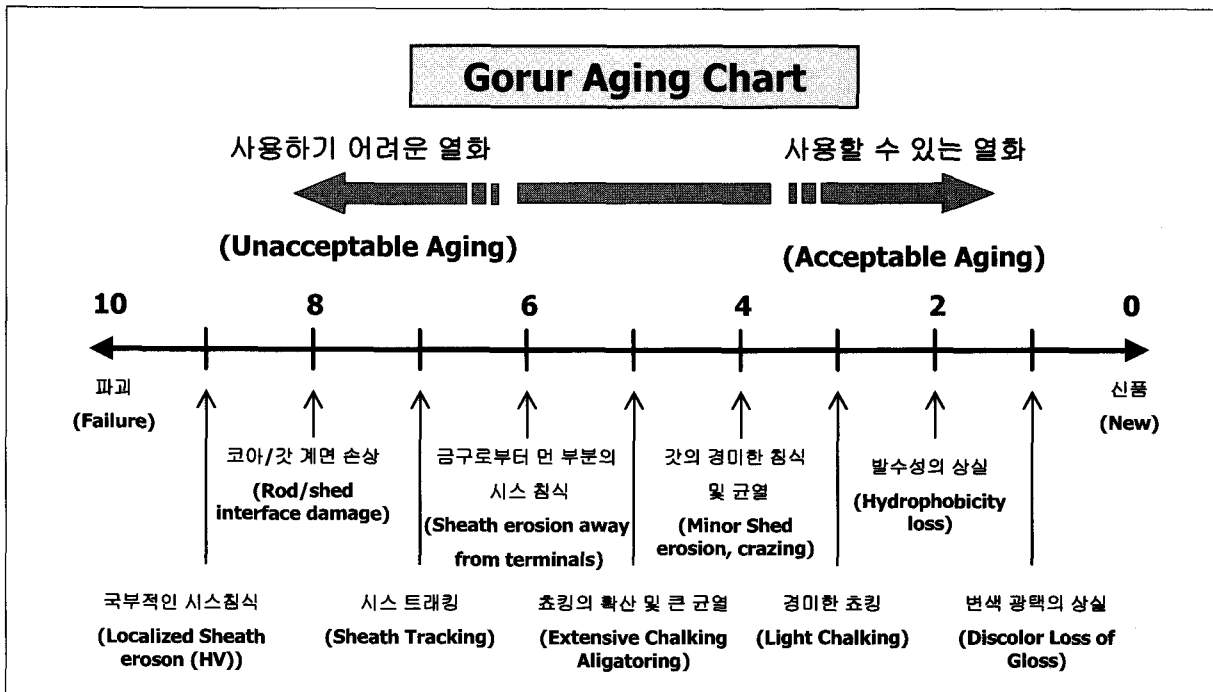
그 다음 세 번째로 중요한 사항이 FRP 코아 및 하우스의 재료이다. 폴리머 원료의 배합비에 따라 재료의 특성이 달라질 수 있으므로 폴리머 애자 제조업체는 시험을 통과한 종류의 재료라 하더라도 계속 그 배합비를 유지하는 지를 확인하고 사용하여야 한다.

네 번째로는 보관, 운반 및 설치가 포함되는 취급(handling)이다. 깨지지 않고 취급이 편하다는 점이 폴리

머 애자의 장점이지만 이 점이 너무 간과되면 던지고, 밟고, 내동맹이쳐지는 등 오히려 폴리머 애자의 장점이 단점으로 작용되어 사고로 이어질 수 있다. 이러한 사항을 종합하면 폴리머 애자의 성능을 만족하기 위해서는 우선 품질관리가 가장 중요하고 그 다음으로는 설계, 재료, 취급의 순서이다. 따라서 한전의 구매규격이나 외국의 규격에 의해 정확히 시험되어 검증된 폴리머 애자는 그 설계나 재료가 수십 년간의 사용에도 견딜 수 있음을 입증하는 것이므로 제조 과정에서의 품질관리만 잘하면 전혀 문제없이 장기간 사용될 수 있을 것이다.

나. 폴리머 애자의 열화와 성능

폴리머 애자는 절연성능이 뛰어나고 가격도 저렴한 반면, 태양광으로부터의 자외선과 전기적 스트레스 등 복합적인 작용에 의한 열화현상은 피할 수는 없으므로 이러한



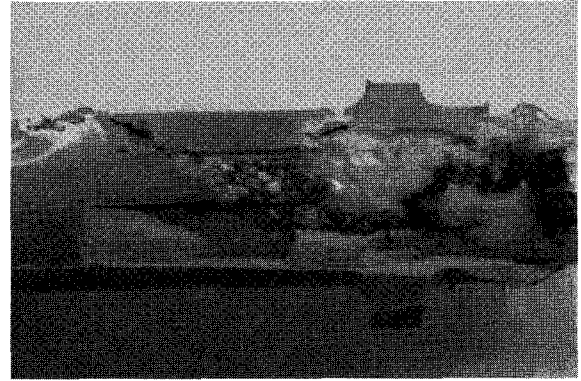
〈그림 9〉 Gorur의 열화 차트

열화 현상의 억제가 연구대상이며 제조자는 이를 극복해야 한다. 현재는 설계 개선과 우수한 신소재 폴리머 재료 개발로 상당부분 열화에 대하여 극복되어 있는 단계이며 이는 이미 30년 이상의 폴리머 애자 사용 실적으로 입증되고 있다. 열화란 시간의 경과에 따라 제품의 품질이 저하되는 현상을 말하며 폴리머 애자에서는 여러 가지 복잡한 형태로 나타난다. Gorur 교수는 폴리머 애자의 열화에 대한 각종 현상이 발생할 경우 실제 사용 현장에서 성능에 어떤 영향을 미치는지를 정리하고 이를 'Gorur Aging Chart'라 하여 발표하였다.⁽¹⁴⁾

Gorur는 이 차트에서 열화를 받아들일 수 있는 것과 받아들일 수 없는 것으로 분류하여 그 정도를 나타내었다. 폴리머 애자의 하우징은 갓(shed)과 시스(sheath)로 분류되는데 시스에 문제가 생기면 FRP 코어가 노출되기 쉽고 이로 인한 트래킹 등의 발생으로 절연이 파괴되므로 심각한 열화로 분류된다. 반면에 갓에 문제가 생기면 약간의 전기적 특성이 저하되는데 그치므로 상대적으로 가벼운 열화로 취급된다.

하우징의 발수성 상실도 경미한 열화로 분류되는데 이는 만약 폴리머 애자의 발수성이 상실되어도 표면이 자기 애자와 같은 상태의 발수성이 되므로 사용상에 큰 문제점은 없다는 뜻으로 해석할 수 있다. 그림 9에서 초킹이란 폴리머 재료의 표면에 첨가제로 사용된 필러(filler)가 노출되는 현상을 말하며 초킹이 발생하면 전기적 성질은 저하되지 않지만 발수성이 저하되는 현상이 나타난다. 그림 9를 요약하면 폴리머 애자의 열화에 가장 민감한 부분은 금구 밀봉, 코아/하우징(시스) 등 계면의 완전성으로서 이러한 계면의 밀봉 효과가 불안정하면 수분이 침투하고 고전압에 의한 트래킹 사고로 이어지기 때문이다.

그림 10에는 계면이 불건전한 시료에서 발생한 트래킹 사진을 소개하였다. 이 그림은 현장 사용에서 발생한 것이 아니고 성능 비교 평가를 위한 자체 연구 결과물이다.



〈그림 10〉 계면의 불완전으로 발생한 트래킹 현상

다. 한전규격과 외국규격과의 비교

다음 표 2에 배전급 폴리머 애자의 한전 구매시방서에서 요구하는 중요 특성치를 외국 규격들과 비교하였다. 비교 대상이 되는 외국 규격들은 세계적으로 폴리머 애자에 대하여 표준화되고 인정되는 대표적인 규격이며, IEEE 1024⁽⁶⁾는 국제규격이고 CEA⁽⁵⁾는 캐나다 전기협회 구매 규격이며 ANSI⁽⁴⁾는 미국 표준 규격이다.

〈표 2〉 한전구매시방서와 외국 규격과의 비교

구 분	한전구매 규 격		IEEE 1024 ANSI C 29.13		CEA LWIWG-01	
	B호	A호	DS-28	DS-35	DS-28	DS-35
사용전압(kV)	22.9		28	35	28	35
건조섬락거리(mm)	280	320	-	-	280	320
뇌충격섬락전압(kV) (정극성)	190	250	190	250	190	225
누설거리(mm)	580	760	550	730	585	720
주수섬락전압(kV)	110	130	100	130	90	110
규정인장하중(kN)	70	70	45	45	70	70

한전의 경우, 폴리머 애자 B호는 기존 자기 애자 2련을 대체하기 위한 것이고, A호는 자기 애자 3련을 대신하기 위한 것이다. 즉, 폴리머 애자 B호는 비교적 청정지역에

서 사용하기 위함이고 A호는 오손 지역에서 사용할 목적으로 설계되었다.

한전 배전선로의 정격전압은 22.9kV이고 계통 최고 전압은 25.8kV이므로 이에 상대적으로 부합되는 외국 규격 형식은 DS28이 된다. 한전의 B호와 외국 규격 DS28과 비교하면 한전 B호의 모든 요구 특성치가 외국 규격보다 동등하거나 높음을 알 수 있다. 또한 한전의 A호는 외국 35kV 규격치보다 동등하거나 높음을 알 수 있다. 따라서 삼면이 바다에 둘러싸여 염해 지역이 많은 이유로 누설거리를 넉넉히 설계하여야 하는 우리 나라의 현실을 감안하더라도, 한전의 폴리머 애자 사양은 충분한 여유를 갖고 있는 것이다.

우리 나라 가공전선은 피복전선이고 외국 전선은 나전선이므로 무게의 차이는 있지만 규정인장하중 기준값도 한전 70kN인데 비하여 CEA를 제외한 IEEE와 ANSI는 45kN을 요구하고 있어 우리의 규정인장하중 기준도 높음을 알 수 있다.

폴리머 애자에 있어서 누설거리는 장기간 사용시의 특성과 관계가 깊으므로 중요한 설계 치수이다. 애자의 누설거리의 설계 기준이 되는 적용규격은 IEC 60815⁽¹⁷⁾이며 오손도에 따라 적합한 누설거리를 제시하고 있다. 이에 따르면 청정지역(light)은 16mm/kV, 경오손(輕汚損, medium) 지역은 20mm/kV, 중오손(中汚損, heavy) 지역은 25mm/kV, 중오손(重汚損, very heavy) 지역은 31mm/kV로 설계하도록 권고하고 있다. 이에 준하여 계산된 누설거리와 국내에 사용되고 있는 자기 애자와 폴리머 애자의 누설거리를 표 3에 비교하였다.

IEC에 의하여 바닷가 근처의 염해 지역이며 염분부착 밀도 0.6kg/cm²인 중오손 지역의 누설거리 기준인 25mm/kV에 한전의 배전 전압인 22.9kV를 곱하면 573mm가 계산되는데 이는 폴리머 애자 B호의 누설거리 기준 580mm 이하가 된다.

〈표 3〉 IEC 60815 기준과 비교한 국내 애자의 누설거리

	IEC 60815 기준 (22.9kV 적용)	자기애자 (191mm, 일반형)		폴리머 애자	
		1련	210mm	-	-
청정 지역	366mm	1련	210mm	-	-
경오손 지역	458mm	2련	420mm	B호	580mm
중오손 지역	573mm	3련	630mm	A호	760mm
중오손 지역	710mm	4련	840mm	-	-

따라서 한전의 B호 애자도 바닷가 근처의 염해 지역에서 사용될 수 있는 누설거리를 갖도록 설계되었다는 것을 뜻한다. 또한 바람이 심한 해안가 바로 옆 등 가장 심각한 오손 지역인 중오손 지역에서 한전의 배전 전압으로 누설거리를 계산하면 710mm가 되며 이는 역시 한전 폴리머 애자 A호 누설거리 기준인 760mm에 못 미친다. 또한 폴리머 애자 A호와 기존 자기 애자 3련의 누설거리를 비교하면 폴리머 애자가 130mm 이상 길기 때문에 자기 애자보다 훨씬 더 우수한 내오손성을 보유하고 있다. 따라서 원래 35kV급인 한전의 A호 애자는 우리 나라 22.9kV 선로에서는 어느 곳에서 사용하여도 충분한 누설거리를 확보하고 있는 것이다.

5. 적용 재료에 관한 고찰

국내에서도 폴리머 애자가 저렴한 가격 및 뛰어난 성능으로 선풍적인 인기를 끌면서 사용이 급속히 증가하여 배전급에서의 사용량은 기존 자기 애자를 능가하게 되었다. 이러한 빠른 증가세와 함께 재질의 종류에 대한 관심도 높아지게 되었다.

폴리머 애자에 대한 한전의 구매규격은 배전급은 재료 구분이 없으며 송전급은 실리콘으로 명시되어 있다. 국내 한전의 배전급 폴리머 애자 하우징의 재료는 현재 공급업체인 평일산업(주)는 EPDM으로 제조하고 있으며 기타 업체는 대부분 실리콘으로 개발하였거나 또는 개발 중이

다. 우리 나라 뿐 아니라 외국에서도 폴리머 애자 재료의 양대 산맥인 EPDM과 실리콘에 대한 논란은 계속되어 왔고 앞으로도 계속될 것이다.

일반적으로는 실리콘이 EPDM보다 고가이나 발수성, 내후성 등이 우수하다는 것이 국제적인 정설이다. 그러나 전기 업계에 종사하는 기술자들 중 재료를 전공으로 하는 전문가들이 극히 드문 우리의 현실에서 EPDM이 좋은가, 실리콘이 좋은가 하는 극단적인 논란은 위험한 결론을 도출할 수 있다.

첫 번째는 3장의 하우징 재료에서 설명한 바와 같이 EPDM이나 실리콘 원재료(기저고분자) 자체보다는 각종 배합제가 혼합된 최종 재료인 컴파운드 특성이 중요하기 때문이다. 즉, 폴리머 애자에서 요구하는 중요 특성을 만족하느냐가 중요한 문제이기 때문에 출발 원료의 종류만 가지고 완제품 컴파운드의 특성을 평가하는 것은 함정에 빠질 위험이 크다.^(18~23) 예를 들어 중국 등으로부터 무분별하게 수입되는 저급의 실리콘 컴파운드가 고급 실리콘의 행세를 할 수 있다는 뜻이다.

두 번째는 사용하는 용도에 적합하면서 경제성이 있느냐 하는 문제이다. Gorur 교수는 국제 폴리머 애자 심포지움에서 송전급은 실리콘과 EPDM이 선택될 수 있는 재료이고 배전급에서는 그 외에 에폭시나 EVA 등까지도 성공적으로 사용되고 있다고 요약, 발표하였다.⁽⁴⁾

또한 그는 한전 전력연구원에서 전문가로 초청하였을 때 국내 배전급 폴리머 애자에 대한 견해에서 구매시방서의 누설거리가 매우 길고 국외의 CEA, ANSI, IEC 등의 규격을 참고로 하였으므로 제조시 품질관리만 문제가 없으면 장기신뢰성은 문제가 없을 것이라고 하였고 발수성과 초킹 등은 중요하지 않으며 양쪽 급구의 밀봉의 안정성이 중요하다고 하였다(한전 전력연구원 연구보고서 참조⁽²⁴⁾).

즉, 35kV급을 22.9kV 선로에서 사용하고 있으므로 구

매시방서의 시험 항목을 통과하고 정확한 품질관리를 통하여 품질을 지속적으로 유지하면 하우징의 재료 구분은 큰 의미가 없다는 뜻이다. 예를 들어 표면에너지가 아주 작고 안정한 구조의 테프론을 하우징 재료로 사용하면 실리콘보다도 발수성과 내후성이 훨씬 우수한 폴리머 애자를 제조할 수 있게 되지만 경제성이 문제가 된다. 비유하면 케이블 도체의 재질에 대하여 도전율이 기존 동보다 우수한 금이나 은으로 하면 케이블의 품질이 훨씬 좋아지고 동으로 제조된 제품은 품질이 뒤떨어진다는 경제성을 도외시한 잘못된 논리가 유사하게 적용될 수 있다는 것이다. 이러한 요구 성능과 경제성이 종합적으로 고려되어 배전급에서 세계적으로 가장 널리 사용되는 재료는 EPDM이며, 각종 다양한 환경에서 폴리머 애자, 폴리머 피뢰기, 폴리머 COS, 케이블 종단접속재 등의 재료로 성공적으로 사용되고 있다.

국내에서는 EPDM이 종단접속재의 재료로서 특고압 선로에서 20년 이상 아무런 문제없이 사용되어 오고 있다. 한전 전력연구원에서는 1999년에 한전 선로에서 13년 동안 운전되어 오던 EPDM 종단접속재를 수거하여 분석한 결과 전기적 특성은 신품과 거의 차이가 없으며 열화도 표면에서만 진행되어 접속재의 성능에 큰 영향을 미치지 않았다고 전기학회지에 보고하여 EPDM의 장기신뢰성을 입증한 바 있다.⁽²⁵⁾

세계 시장에서, 특히 배전급에 사용되는 재질별 사용 통계는 세계적인 애자 잡지인 Insulator New & Market Report사에서 발표한 적이 있으며 다음과 같다.⁽²⁶⁾

〈표 4〉 배전급 애자의 재질별 사용량

재 질	사용비율
EPDM(Alloy 포함)	50~55%
실리콘	35~40%
기타(EVA, 에폭시 등)	5~15%

6. 맺음말

이상과 같이 폴리머 애자용 재료, 폴리머 애자의 특성과 요구 성능, 한전구매시방서에서 요구하는 여러 특성치가 국내 환경에서의 실제 요구와는 어떤 차이가 있는지를 알아보고 다음과 같이 요약한다.

- ① 폴리머 애자는 뛰어난 절연특성과 저렴한 가격으로 기존 자기 애자를 급속히 대체하고 있다.
- ② 폴리머 애자의 장기신뢰성에 대해서는 선진 외국의 30년 이상의 사용실적으로 증명되며, 국제 규격을 참고로 한 한전 구매시방서의 시험에 통과하고 품질

관리를 정확히 한 제품은 현장에서 전혀 문제없이 사용될 수 있다. 이는 현재 한전배전로에 220만 개가 취부되어 있으며 7년 이상 한 건의 사고 없이 사용되고 있는 것으로 입증된다.

- ③ 폴리머 애자의 설계와 재질은 인정시험을 통하여 입증되므로 최종 성능은 제조업체의 품질관리 능력에 크게 좌우된다.
- ④ 국내 배전급 폴리머 애자는 누설거리가 충분하게 설계된 제품으로 개발시험에 합격된 제품은 재질을 구분하는 것보다는 경제성에 비중을 두는 것이 바람직할 것으로 사료된다. ❏

〈참고문헌〉

- (1) J. F. Hall, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, pp. 376~385, 1993
- (2) J.S.T.Looms, "Insulators for High Voltages", IEE, pp. 231~240, 1988
- (3) IEC 61109, Composite Insulators For A.C. Overhead Lines with a Nominal Voltage Greater than 1000 V, 1995
- (4) ANSI C29.13, Insulators-Composite-Distribution Deadend Type, 2000
- (5) CEA LWIWG-01, Dead-end/Suspension Composite Insulator for Overhead Distribution Lines, 1996
- (6) IEEE 1024, Standard For Specifying Distribution Composite Insulators, 1998
- (7) 한전 구매시방서, 배전용 폴리머 현수애자
- (8) F. P. Baldwin and G. Ver Strate, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 45, p. 739, 1972
- (9) R. J. Arhart, IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol. 9, p. 34, 1993
- (10) R. S. Gorur et al., International J. Energy Systems, Vol. 11, p. 122, 1991
- (11) A. Whelan and K. S. Lee, Rubber Technology, pp. 203~232, 1988
- (12) S. H. Kim, IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 27, pp. 610~622, 1992
- (13) R. F. Ohm, Rubber Handbook, pp. 195~210, 1990
- (14) R. S. Gorur, Proc. Insulator 2000, Spain, pp. 1~12, 1999
- (15) S. Sundhar et. al. IEEE Conference Record of 1992
- (16) J. T. Burnham, Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology, 1995
- (17) IEC 60815, Guide For The Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions, 1986
- (18) A. E. Vlastos and E. Sherif, Proceedings of International Conf. on Dielectric Materials, pp. 41~44, 1982
- (19) J. Mackevich et. al., Electrical World, pp. 53~54, 1991
- (20) J. Mackevich and S. Simmons, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, pp. 10~16, 1997
- (21) E. A. Cherney, Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology, 1995
- (22) W. Schmidt, Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology, 1996
- (23) E. A. Cherney and D. J. Stonkus, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-100, pp. 131~139, 1981
- (24) 한전 전력연구원 연구보고서, "배전용 폴리머 애자의 신뢰성 평가 및 운용기준 제정", 2001. 2. 21.
- (25) J. H. Han et al., Trans. KIEE, Vol. 48C, pp. 580~586, 1999
- (26) Unpublished, Insulator News & Market Report, 1999