



# 電力用 碍子の 特性 및 屋外 實證試驗

이 동 일\*, 김 정 부\*\*

(한전 전력연구원 \*책임연구원, \*\*전력계통연구실장)

碍子は 電力設備에서 가공 송배전선로의 전선이나 변전소에서 변대를 지지물에 취부하기 위하여 설치하는 절연재료인 관계로, 가혹한 옥외기상조건의 변화에도 충분한 내구성을 갖도록 電氣的, 機械的 特性면에서 우수한 내구성이 요구된다. 따라서 本 稿에서는 이러한 碍子の 種類와 特性을 제고하고, 送電用碍子の 옥외실증시험 사례를 소개하고자 한다.

로 완목 또는 완금에 수직으로 취부하고, 상부의 홈 또는 측부의 홈에 바인드선 등으로 전선을 고정·지지하며 주로 고저압전선로, 통신선로에 사용된다.

## 1. 碍子の 種類

### 1.1 形狀에 의한 碍子の 分類

#### 1.1.1 懸垂碍子

현수애자는 옥외 전선로의 절연용으로 가장 널리 사용되는 애자로 지지물의 완금에 애자를 달고 하단에 전선지지 금구를 부착하여 전선을 지지하는 구조로 되어 있으며, 갖 형태의 磁器등을 절연체로 하고 여기에 Cap과 Pin의 연결 금구를 시멘트로 접착한 구조이며 1개~수십개를 연결하여 사용한다. 이 종류의 애자는 자기부분의 직경 또는 課電破壞荷重值에 의하여 分類, 呼稱된다. 더구나 현수애자에는 耐鹽用懸垂碍子도 포함되고 耐霧碍子, 스모그애자, 깊은 주름형애자 등으로 호칭되는 경우가 있다.

#### 1.1.2 長幹碍子

장간애자는 원통형 磁器棒에 적당한 갓을 붙이고 그 양단에 Cap을 붙인 형태로 사용시에는 磁器棒 자체에 引張荷重이 가해지도록 되어 있다. 장간애자는 갓 2매를 가진 애자로부터 發展하여 全長, 갓의 數를 증가시켜 현수애자처럼 연결하여 사용할 수 있으며, 장간애자는 송전선로 외에 교류 및 직류 전차선로용 애자로 널리 사용되고 있다.

#### 1.1.3 Pin碍子

갓모양의 자기를 1개 또는 여러층의 형태로 겹쳐서 시멘트 접착한 것에 갓의 기둥(몸통)에 맞는 Pin을 취부한 구조

#### 1.1.4 Line Post 碍子

사용상태는 Pin애자와 같고 완목 또는 완금에 Pin을 사용하여 수직으로 취부한다. 이 애자는 원통형 磁器體에 적당한 갓을 붙이고 상부에는 Pin애자 모양처럼 바인드선 등으로 전선을 고정, 지지하므로 상부 또는 측부에 선의 홈을 만들거나 전선크랩 취부를 위한 Cap을 만든다. 하부는 베이스금구를 접착하고 이 금구에 애자 취부용 Pin을 고정시키고 있다. 자기부분이 원통형이므로 無劣化, 無貫通의 애자로서 Pin애자 대신으로 Line Post 애자가 사용된다. 裝柱의 美化, 經濟性에서 수평취부를 목적으로 하는 Line Post 애자도 사용되고 있다.

#### 1.1.5 支持碍子

지지에자는 용도에 의하여 옥외지지에자와 옥내지지에자로 크게 구별된다. 또 형태에 따라 Pin지지에자, 圓板支持애자, Station Post애자 등으로 나뉘어 진다. 이들 모두 발전소, 변전소, 개폐소등의 모선지지 혹은 단로기 등의 절연에 사용되는 것으로, Pin 지지에자, 원통지지에자, Station Post 애자, 옥내지지에자, 송전용지지에자등이 있다.

#### 1.1.6 引留용애자

· 자기를 압축한 것 같은 모양에 서로 교차하여 인장하중을 가하는 것으로 도체를 인류하고 절연하는 애자이며, 형태에 따라 차받침형碍子, 구슬애자, 우물형애자등으로 불리고 있다. 주로 고저압 배전선의 인류용으로 사용된다. 고압 배전선 인류용으로써 종래에는 차받침형애자를 사용하였으나 최근에는 이 대신에 현수애자와 유사한구조의 고압내장애자가 거의 점유하게 되었다. 저압선로용 차받침형애자 등

의 인류 애자류는 배전방식의 합리화 등의 사유로 사용량이 감소하고 있다.

## 1.2材質에 의한 碍子の分類

### 1.2.1 磁器碍子

애자라고 하면 일단 磁器製 애자라고 해도 좋을 정도로 애자류는 절연부에 자기를 사용하고 있다. 자기는 이것을 구성하는 재질에 따라 성질을 다르게 하지만 애자에 사용되는 자기는 硬石, 長石, 粘土를 원료로 하는 長石質磁器가 주류를 이루고 있다.

한편 초고압송전시대에 부응한 33,000kgf 이상의 강도를 가진 현수애자, 내진용의 초강도애자, 높은 내압력에 견디는 애관 등 기계적특성이 우수한 애자의 필요성 때문에 알루미늄을 함유한 고강도 자기가 실용화될 수 있게 되었다. 이 자기는 알루미늄합유자기라고 불리운다. 이외에 고주파 절연용으로써 steatite자기, 내열용으로 cordierite자기 및 zircon자기, 기계적 전기적특성이 매우 우수한 알루미늄자기 등 이들 모두 그 주성분으로 호칭되는 一連의 특수자기이다

### 1.2.2 유리碍子

고주파 절연용으로 주로 사용되고 있으며, 붕규산유리는 아주 오래 전에 제조 되었고 영국 및 프랑스 등에서 송전선로용으로 쓰이는 현수애자와 핀애자의 절연부에 유리를 사용하였다. 이른바 유리아자를 제조하고 유럽과 그 외의 지역에서 사용되었다. 이 애자의 소재는 소다유리이지만 강화된 것이 특징이다.

### 1.2.3 高分子 碍子

고분자 애자류로는 1930년경 스위스에서 개발된 에폭시 수지를 시작이며 에폭시 수지는 많은 특징을 갖고 있어, 1950년대에 들어와서 유럽에서 처음 애자류에 적용을 시도하여 실용화 되어 왔다. 한편 일본에서도 1960년에 10kV 및 100kV급 지지애자 개발이 시작된이래 옥내용은急速히 실용화 되었으며, 에폭시수지의 耐候性, 絶緣性能, 耐트래킹性, 기계적강도등이 향상되어 일부에서는 옥외용으로도 사용되곤 하였다. 최근에는 초고압 옥외 절연물이 자기애자에서 고분자애자(Polymer Insulator)로 대체되어 가고 있는게 세계적인 추세이다. 고분자애자는 저가 경량인 장점에 이어 장기 신뢰성이 확인되면서 최근 현장적 용이 가속화 되고 있다. 고분자애자의 성공적 출현은 FRP Rod의 우수한 기계적강도와 Silicone Rubber, EPDM, EVA, Epoxy 등 shed 용 고분자재료의 뛰어난 장기절연성능에 기인하고 있는데 케이블접속재, 피뢰기 Housing, Bushing 등을 포함한 모든 옥외절연물들이 고분자 복합소재화 되고 있다. 특히 고분자 재료중 Silicone 고무는 우수한 절연성능과 내광성, 내열성, 산화안정성, 내후성이 뛰어나고 표면에너지가 낮아 발수성이 뛰어나므로 습기나 오염물질이 존재하는 경우도 누설 전류를 제한하는 중요한 역할 때문에 송전용애자의 shed 재료로서 주로 사용되고있다.

## 2. 碍子の材質 및 特性

### 2.1 磁器

#### 2.1.1 磁器의 特徵

자기는 「세라믹」이라고 하는 말로 총칭되는 요업제품의 일종이고 점토와 유사한 무기물질을 가소성의 상태로 성형 건조시키고 다음으로 유리체를 생성하여 鎔化하는데 충분한 고온으로 구워 마감한 것이다. 그 미세구조는 불균질한 유리중에 결정체와 閉氣孔이 분산되어 있는 대단히 복잡한 複合體이다. 자기의 물리화학적 특성은 주로 그 미세구조를 구성하고 있는 결정체 및 유리체의 종류와 양에 의하여 결정된다. 磁器의 特徵은 물론 양호한 절연성에 있으나 타재료에 비하여 현저한 내후성, 내열성이 우수한 점, 내수성, 내화학품성도 있고 기계적하중에 대하여 형상의 변화가 작은 점, 가격도 비교적 저렴한 점등을 들 수 있다. 그러나 한편으로는 충격하중에 대하여 약하고 燒成 후의 가공성이 없는 결점이 있다.

#### 2.1.2 애자용 磁器의 種類

애자용자기는 硬石, 長石, 粘土를 원료로 하는 보통자기를 기본으로 하는 것으로 종래에는 조성적인 관점에서 長石質 普通磁器와 알루미늄 함유磁器로 구별하는 것이 일반적인 생각이었다. 그러나 최초 구미에서는 일본의 장식질 보통자기의 기계적강도가 높은점에 주목하여 일본이나 우리의 자기는 조성적으로는 장식질 보통자기에 상당하지만 크리스토프라이트 결정체에 의해 고강도를 실제로 나타낸 제3의 자기로써 다음의 3종류로 구분되게 되어졌다.

- (1) 장식질 보통자기
- (2) 알루미늄 함유자기
- (3) 크리스토프라이트 자기

이들의 자기는 제조가 간편한 점, 성능, 가격면에서 각각 특징이 있어 최근에는 종래의 전통적인 크리스탈 라이트 자기 뿐만아니라 장식질 보통자기, 알루미늄 함유자기 등 모두 사용목적에 맞게 제품화 되어 있다.

#### 2.1.3 애자용 자기

##### a) 長石質 普通磁器 組成과 特徵

硬石, 長石, 粘土를 원료로 하는 자기로 典型的인 재료의 조합비율은, 경석 15~30%, 장식 20~40%, 점토 40~60%이다. 소성온도는 약 1200℃ 소성 후의 자기 조성은 10~20%의 석영과 10~20%의 mullite가 결정체로 존재하고 나머지는 불균질한 유리이다. 결정체의 재료로 石英은 원료로써 배합한 경석이 일부분 녹아 잔류한 것이고 mullite는 점토와 장석이 고온에서 반응한 생성물이다. 소재의 입자가 거칠어 성형성은 양호하지만 기계적강도는 낮고 시험결과와 곡률강도는 600~1000kgf/cm<sup>2</sup> 정도이다.

**b) 알루미늄 함유자기組成과特徵**

장석질 보통자기의 기계적강도를 개선할 목적으로 개발된 高强度磁器이다. 원료로는 경석 대신에 10~40%의 알루미늄을 사용, 소성후의 자기중에 10~40%의 알루미늄의 결정을 함유한 것이 특징이다. 이 자기의 기계적강도가 장석질 보통자기에 비하여 높은 원인은 알루미늄 결정의 高탄성계수와 고유강도가 유리질 매트릭스의 강화에 기여함과 동시에 장석질 보통자기에서 볼수 있는 굵은 석영입자에 의한 강도 저하의 비율이 적기 때문이다. 따라서 알루미늄 함유량이 많고 석영이 적을수록 강도는 높아 시험결과의 굽힘강도는 1200~1700kgf/cm<sup>2</sup> 정도를 얻을 수 있다. 그러나 원료의 원가는 보통의 원료보다 비싸게 되고 비중이 크므로 애자의 형상이 변하지 않으면 제품 중량이 증가한다.

**c) Cristobalite 자기組成과特徵**

자기중에 Cristobalite 결정을 15~40% 함유하는 하는 것을 특징으로 하는 일본고유의 고강도자기이다. Cristobalite 이외의 결정으로써는 20~25%의 멀라이트와 3~15%의 석영을 함유한다. 시험치의 곡률강도는 1000~1400kgf/cm<sup>2</sup> 으로 높아 알루미늄 함유자기의 강도에 가깝다. 이 Cristobalite 자기의 강도를 나타낸 효과는 다음의 4개의 효과가 서로 변환 것이다.

- (1) 유리중에 존재하는 고펡창의 Cristobalite 미결정과 주위 유리의 열팽창 차에 의해 생기는 미시적인 압축변형의 효과 (Cristobalite 결정의 입자가 미세하며 압축변형이 지배적으로 된다. 거친 입자의 석영에서는引張 변형이 작용하여 강도를 저하시킨다)
- (2) 유리중에 분산한 미세한 결정이 미시적인 결함의 성장을 방지하는 효과
- (3) 자기중에 생성한 Cristobalite의 배치방향과 분포량의 조절에 의해 생기는 거시적 압축변형에 의한 효과
- (4) 素地の 높은 열팽창을 활발히 한 압축유에 의한 강도향상 효과

Cristobalite 결정은 일본 특유의 陶石質 원료에 포함된 미세한 석영이 소성과정중에서 변화한 것에 의하여 생성한 것이다. 이처럼 알루미늄 함유자기와 비슷한 강도를 갖고 성형성도 양호하여 소성에 즈음해서는 자기화범위가 넓고 두꺼운 애자도 내부까지 치밀하게 자기화 하는 특징이 있는 반면, 열팽창율이 높아 200℃ 부근에서 Cristobalite에 의한 팽창의 굴곡점이 있어 이상한 熱衝擊에 대한 저항은 다른 자기보다 약간 낮다.

**2.1.4 磁器의 物理的 特性**

**a) 熱膨脹率**

장석질 보통자기와 Cristobalite 자기의 열팽창곡선은 직선이 아니고 모두 특유의 곡선이 된다. 그 이유는 자기에 함유된 Cristobalite가 210~260℃에서, 석영이 573℃에서 각각 결정이 전이를 하기 때문이다. 따라서 열팽창의 대소의 정도는 이들 결정의 양에 비례한다.

보통자기에는 이러한 異常膨脹이 있어 이 온도 부근의 가열, 냉각은 피하도록 주의해야 한다. 자기의 내열 충격 저항성의 크기는 거의 열팽창율의 대소에 의해 결정된다. 그런데 내열 충격저항성의 관점에서 보면 자기의 열팽창율은 낮은편이 좋지만 한편으로는 기계적강도를 나타내는 데는 결정의 종류와 양에 최적의 범위가 있어 열팽창율은 자연히 일정범위의 값을 갖게 된다.

**b) 機械的性質**

**① 일반적 특성**

자기는 깨지기 쉬운 물질이다. 壓縮應力에는 강하지만 引張應力에는 약하다. 조성적으로는 결정량의 증가와 함께 강도도 증가한다. 특히 알루미늄 결정은 강도의 증가에 효과적이다. 시험치의 곡률강도로는 1700kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 높은 강도를 보이는 것도 있지만 실제의 제품으로는 후에 기술하는 것처럼 강도의 크기 효과가 있어 시험치의 수치가 증가하면 강도는 저하한다. 인장강도는 밴딩강도의 약 1/2이다. 탄성계수는 750,000kgf/cm<sup>2</sup> 정도이며 응력-變形線圖는 직선이고 후크법칙(Hook's law)에 따른다. Poisson's ratio는 약 3이다.

**② 강도**

ASTM, VDE 등의 규격에는 작은 시험체로 자기의 강도를 측정하는 방법이 정해져 있다. 그러나 자기의 강도는 시험체의 직경에 의하여 달라지고 실제 제품의 강도와도 거리가 멀다는 것은 잘 알려져 있다. 이처럼 강도가 시험체(크기)의 영향을 받는 현상은 Weibull의 이론에 의해 설명이 가능하다. 이 이론은 다음 두가지 개념에 기초를 두고 있다.

- (1) 재료는 확률적으로 분포한 미시적 결함이 있다.
- (2) 破壞는 이 결함으로부터 일어난다. 강도의 측정 결과는 결함의 분산에 의존 한다.

자기처럼 결함이 全容積에 균일적으로 분포하고 있다고 가정하는 경우 다음 식이 유도된다.

$$\sigma \propto V^{-1/m}$$

$\sigma$  : 시험체의 파괴강도,  $V$  : 시험체의 용적,  
 $m$  : 시험재료에 고유의 균일계수 (>1)이다.  
 $m$ 이 클수록 용적의 증가에 의한 강도의 低下率이 작다.  
 $m$ 은 인장(均一應力分布), 곡률(不均一應力分布)의 어느 경우에도 같다는 것이 이론과 실험에 의하여 확인되었다. 시료의 직경과 길이의 비가 일정한 경우에는 식은 다음과 같이 된다

$$\sigma \propto \phi^{-3/m}$$

$\phi$  : 시험체의 직경

애자용 자기의  $m$ 은 재질에 의하여 많이 달라져 13~25이다. 자기의 조직이 미세, 균질한 정도가 크다.

c) 電氣的 性質

① 體積抵抗率

자기의 체적저항율은 온도의 상승과 함께 저하한다. 체적저항율이 1MΩcm로 되는 온도(Tel 치라고함)는 애자용자기에는 약 300℃, 알루미늄나 자기 및 Zircon 자기는 500~900℃이다. 자기의 체적저항율은 자기 중에 포함된 알카리 성분에 현저한 영향을 받는다. 애자용자기의 체적저항율과 자기중의 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O 함유량의 관계를 표시한 실험식이다.

$$\rho_{25^\circ\text{C}} = 10^{13.1} \cdot [K_2O]^{1.5} \cdot [Na_2O]^{-4.5}$$

단, ρ<sub>25℃</sub> : 25℃에 있어서 체적저항율 [Ωcm]

[K<sub>2</sub>O] : 자기중의 K<sub>2</sub>O 성분의 중량 퍼센트

[Na<sub>2</sub>O] : 자기중의 Na<sub>2</sub>O 성분의 중량 퍼센트

자기중의 알칼리성분은 K<sub>2</sub>O : 1.5~4.5%, Na<sub>2</sub>O : 1.2~2.0%의 범위에 있고 그 대부분이 사용하는 장석질 원료에서 공급 되므로 장석의 종류의 선택이 중요하다. 실용상은 체적저항율의 차가 상온에서 10<sup>12</sup>Ωcm이상이면 애자용자기 재질로서 문제가 없다.

② 比誘電率

비유전율은 조성에 의하여 변화하는데 장석질자기에서는 5~8, Zircon 자기 및 알루미늄나 자기에서는 8~10 (모두 상온의 60 Hz 일때)의 범위에 있다. 비유전율의 온도계수는 일정하다.

③ 誘電正接(tanδ)과 誘電損

tan δ은 자기 조성중의 알카리성분의 증가와 온도상승으로 급격히 증가한다. tan δ는 유전손실을 나타내는 파라미터 이므로 tan δ가 큰 자기를 고주파 또는 고온의 영역에서 사용하면 발열하고 절연성유지가 안되거나 기계적으로 파괴되거나 하기 때문에 용도에 적합한 자기를 선택해야만 한다.

④ 絶緣耐力

자기의 전기적특성 중에서 특히 절연내력은 시료의 형상, 크기, 측정조건에 의해 값이 달라지지만 애자용자기의 절연내력은 VDE의 방법으로 실온에 의한 300kV/cm 정도이다.

2.2 유리

2.2.1 유리 종류

전기절연용으로 쓰이는 유리의 종류는 그 주성분에 의해 「석영 유리」 「소다석회유리 (Soda-lime glass)」 「납유리」 「붕규산 유리(boron-silicate glass)」 등으로 구분된다.

a) 석영유리

석영유리는 경사와 수정의 분말을 약 1800℃에 가열 용융시켜 만들고 알칼리성분을 거의 함유하지 않고

있어 저항율이 높고 유전손도 작으며 절연성이 우수하다. 또 열팽창계수가 작고 화학적으로 안정되었기 때문에 고주파 절연물등에 쓰인다.

b) 소다석회 유리

소다석회 유리는 저가격이고 연화온도가 높고 성형가공이 쉽지만 알카리성분이 많으므로 전기절연용으로는 그다지 적당하지 않았었다. 그러나 근래에는 BaO 성분의 도입에 의한 유전특성이 개량되어 우수한 자기애자를 구할수 없는 일부의 국가에서는 배전용 및 송전용 애자로 사용되게 되었다.

c) 연(납)유리

납유리는 PbO를 함유한 유리로 연화온도가 낮고 가공이 쉬우며 절연특성도 비교적 양호하므로 주로 진공관 유리용으로 쓰여지고 있다.

d) 붕소규산염 유리

붕소규산염 유리는 전기적으로 유해한 알카리성분이 적고 용융, 가공 등이 비교적 용이하며 기계적강도와 耐急熱急冷 특성이 풍부하고 절연성도 우수하다. 「Pyrex (미국), Terex (일본)」 등의 상품명으로 알려진 것으로 통신기기의 절연물, 안테나 애자, 통신애자 등의 고주파용으로 쓰이고 있다.

e) 무알카리 유리

전선 등의 절연피복 등에 쓰이고 있는 유리섬유는 알카리 함유량이 많은 유리로는 화학적 안정성 및 절연성 등이 떨어지므로 무알카리 유리를 원료로 하고 있다.

2.2.2 전기절연용 유리의 特性

a) 機械的性質

유리의 파괴는 인장응력에 의해 표면부터 갈라지고 그외의 脆性破壞를 나타내는 물질과 같도록, 그 強度測定値의 평균치 보다 일반적으로 크다. 예를 들면 동일 모집단에 속하는 판유리 시료의 곡률강도는 700~1600kgf/cm<sup>2</sup>에 이른다. 이처럼 큰 평균치를 나타내는 유리의 강도는 그 평균치에 주목한 경우, 시료의 크기, 표면상태(상처의 유무), 열처리 조건, 화학처리 조건, 측정조건 등에 의해서도 크게 변동한다. 따라서 유리의 실용강도를 논하는 것은 일반적으로는 매우 곤란하다. 일반적으로 유리의 실용강도는 그 이론강도의 1/100 정도로 되어 버린다고 생각할 수 있고, 그 원인을 Griffith는 유리의 표면에는 미세한 결함이 분포해 있고, 인장응력하에 있어서, 그 결함에 응력의 집중이 발생하기 때문에 설명했다. 이 Griffith's Crack 이론은 유리의 실용강도와 이론강도의 차 및 실용강도의 크기의 효과를 설명하는데 매우 유효한 것이다. 또 공냉강화에 의해 유리의 표층부에 압축응력을 그리고 내측에 인장응력을 발생시키면 외력을 가한 경우에 그

것에 의해 생기는 인장응력을 약간 제거하는 효과, 한편은 유리 표면의 Griffith's flaw의 확대를 방지하는 효과를 가져오기 위하여 예를들면, 소다석회 유리의 실용강도(인장강도) 150kgf/cm<sup>2</sup>를 空冷 強化 처리함에 의해 950kgf/cm<sup>2</sup> 정도까지 상승이 가능하다.

**b) 電氣的性質**

유리는 전형적인 이온 전도성물질로 이온이 전압에 의해 이동하여 전기를 전달한다. 통상 이 이온은 유리 형성산화물의 이온, 특히 Na<sup>+</sup> 이온이다. 예를들면 유리중에 Na<sub>2</sub>O가 들어가면 Na<sup>+</sup>는 이동도가 매우 크므로 유전손이 증대 저항을 저하 등의 현상이 생긴다. 일반적으로 알칼리성분을 도입하면 Na<sub>2</sub>O와 같은 특성변화를 볼 수 있지만 그 변화의 정도는 Na<sub>2</sub>O가 가장 현저하다. 이 처럼 유리의 유전특성, 저항율은 유리의 조성에 의해 거의 결정된다고 생각해도 좋다. 예를 들면 유전특성 및 저항율이 우수한 유리를 얻기 위해서는 무알칼리 유리처럼 알칼리성분의 도입을 피해야만 한다. 유리를 포함한 일반적인 절연물의 절연파괴는 동일 물질에도 열적원인에 기인 한 것과 전자적인 원인에 기인한 경우가 있다. 유리는 일반적으로 거의 열적 원인에 의한 것이라고 생각해도 좋다. 즉 전압에 의하여 유리에 전류가 흐르고 주울열로 가열되어 저항율이 낮아지고 전류가 증가하여 열이 발생하여 유리가 국부적으로 열적파괴 된다. 따라서 일반적으로는 유전특성이 양호하고, 저항율이 큰 만큼 절연내력이 큰 경향이 있다. 또 시험체의 형상, 크기 등에 의해 측정치에 현저한 차를 볼 수 있다. 예를들면 판유리의 두께가 2mm인 경우 절연파괴강도가 14.0kV/mm인 정도에 반하여 4mm의 경우에는 7.5kV/mm 정도로 저하한다. 이것은 주울열에 의한 열에너지의 방열속도가 시험체의 크기 등에 의하여 달라지기 때문이다. 유리애자는 자기애자에 비하여 표면 오손 누설전류에 의한 침식이 일어나기 쉽고 애자용 재료로써 개량을 요하는 점이 있다. 이것은 자기에 비하여 유리중의 Na<sub>2</sub>O 성분이 많기 때문이라고 생각할 수 있다.

**2.3 高分子**

**2.3.1 高分子碍子の種類 및 特性**

송전용 애자로 사용된 것은 초기의 에폭시수지, 그리고 최근의 배전용 고분자애자 원료로 사용되고 있는 에틸렌-프로필렌 고무(EPR, Ethylene Propylene Rubber)계의 에틸렌 프로필렌 디엔모노머(EPDM) 그외에 실리콘 탄성체가 있다. 高分子碍子は 가볍고 내충격성이 뛰어나며 전기절연성이 기존의 절연재료를 능가할 뿐만아니라 시공이 간편하고 자기애자에 비해 가격이 저렴하다. 또한 고분자애자는 우수한 발수성을 갖고 있어 누설전류에 대한 높은 저항을 나타낸 것은 물론 오염조건하에서도 오염물질의 부착이 용이하지

않다. 특히 실리콘고무의 경우 수년동안 사용한 경우에도 표면 발수성(hydrophobicity)이 유지되어 절연성능에 거의 변화를 일으키지 않는 것으로 알려져 있다. 이러한 발수성 회복특성은 절연재 내부로부터 분자량이 작은 실리콘 고분자 성분의 확산에 기인하는 것으로 알려져 있다. 즉, 각종 오염물질이 표면에 부착되어 방전을 일으키고, 연속적인 환경에 따라 표면의 저분자량 성분이 없어지면 벌크에서 서서히 분출되어 오손물을 포괄하기 때문에 발수성이 회복되는 것이다. 이런회복 특성은 재료의 경년열화와 함께 저하하게 되며 이것이 실제 수명을 결정하는 요인으로 작용할 수 있다.

EPR계의 애자용 절연재료로는 3가지 형태가 흔히 사용되는데, 에틸렌-프로필렌 모노머(EPM), 에틸렌-프로필렌 디엔 모노머(EPDM), 에틸렌-프로필렌과 실리콘의 공중합체(ESP)이다. EPDM과 실리콘 알로이는 두재료의 특성을 조합할수 있으며, 적절하게 컴파운딩된 알로이는 EPDM의 존재와 실리콘의 발수성 때문에 전기적, 기계적 특성이 우수하다. EPDM이 내오존성, 내열성, 내후성 등에서 우수한 특성을 보이게 한다. 컴파운딩에 따라 150~175℃ 범위까지도 사용할 수 있고, 유리전이온도가 -60℃ 정도에 이르므로 저온에서의 탄성도 우수하다. 또한 분자구조가 탄소-수소, 탄소-탄소 결합으로만 이루어져 있어서 극성기가 없으므로 절연성능이 뛰어나며 XLPE (crosslinked polyethylene)에 근접한 특성을 나타낸다. 첨가제가 포함되지 않은 EPDM의 비유전율은 2.4이며, tan δ는 0.0006이다. 산, 알칼리, 물 등과 같은 극성용매에 대한 저항성은 강하지만 톨루엔, 가솔린, 광유, 절연유 등과 같은 비 극성용매와는 용해도 지수가 비슷하여 (δ=7~8) 쉽게 팽윤되므로 실제품 사용시 주의해야 한다.

가공 전기절연을 위한 실리콘 탄성체에는 3가지 형태가 있으며, 실온경화(RTV), 액체실리콘고무(LSR)와 고온경화(HTV)이다. 약 1965년경에 석영 충전제를 넣은 RTV가 애자에 처음 사용되었으며, 1979년에는 HTV가 애자에 도입되었다. 실리콘 고무는 Si-O 결합강도가 C-C 결합강도보다 상당히 크기 때문에 자외선 또는 산소에 대하여 안전한 성질을 나타내며, 폴리머 결합에너지는 그림 1과 같다.

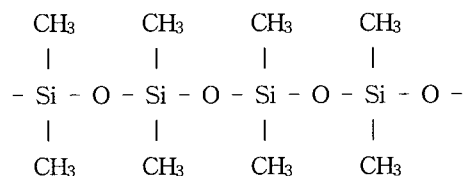


그림 1. 실리콘고무 화학구조

**3. 送電用碍子の 屋外實證 試驗**

**3.1 옥외절연물의 絶緣熱化**

**3.1.1 絶緣熱化 要因**

기기의 절연성능은 장기간에 걸쳐 안정되어야 하지만 사

용기간이나 환경조건과 따라 초기의 성능이 시간과 더불어 점점 저하된다. 이 현상을 절연열화 (Insulation degradation)라 한다. 절연열화를 그 요인별로 분류하면 다음과 같다.

**a) 熱열화**

화학반응을 촉진하는 온도상승은 특히 유기질 재료의 화학구조의 열화속도를 증가시키고 수명을 단축하는 가장 일반적인 열화 요인이다.

**b) Arc열화**

절연체의 표면이 뇌나 개폐 surge 등에 의해 발생하는 아크방전에 반복적으로 노출되면 도전성의 탄화로를 일으켜 표면의 절연성이 상실되는데 이것을 아크 열화라 한다.

**c) Tracking 열화**

오손물질로 습윤된 고체 표면에 전압이 인가되면 큰 누설전류가 흐르는데 이에 의한 joule열이 발생하게 되고 건조한 표면의 국부적 방전에 의한 열 때문에 도전성 탄화물이 절연물 표면에 형성되는데 이것을 트래킹열화라고 한다.

**d) 部分放電열화**

고체 절연체의 내부에 존재하는 void를 완전히 제거한다는 것은 설계 및 제조기술면에서 대단히 어려운데 이와 같은 상태에서 고전계가 인가되면 재료 내부 void에 존재하는 기체가 기중 코로나방전을 일으켜 고체를 열화시킨다. 이것을 부분방전열화라 한다.

**e) Treeing 열화**

비교적 두꺼운 절연체에서는 부분방전에 의한 열화가 한 곳에 집중되어 피트(pit)형이 되는데 열화가 지속되면 나무모양의 파괴괴가 진전되어 결국 전로관통 파괴에 도달한다. 이와 같은 열화는 그 진전모양이 나무모양이므로 트라열화라 한다. 최근 고체내에 미량의 수분이 존재하면 대단히 낮은 전압에서 전기화학작용에 의해 수tree열화가 진행되는 것으로 알려져 있다

**3.1.2 絶緣物 熱化過程의 特徵**

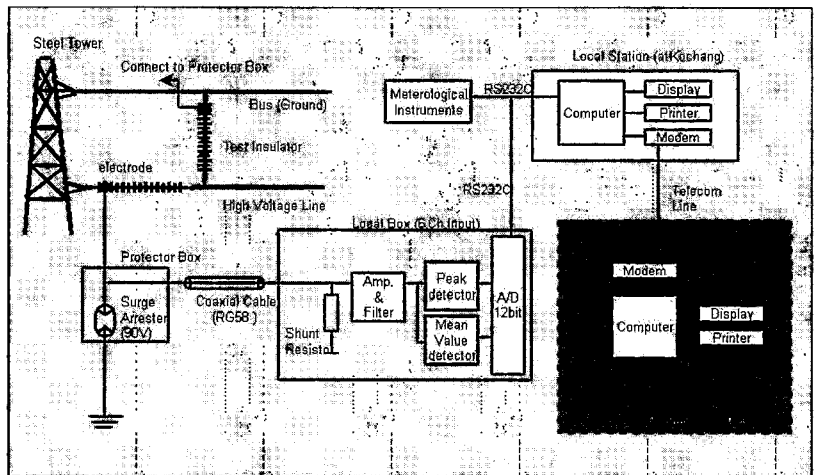
옥외 절연물은 요구수명이 길고 기계적, 전기적 부하가 항상 걸려 있어 열화에 의한 성능저하가 문제가 되고 있다. 절연물의 사용환경과 열화과정의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 재료열화는 장기간에 걸쳐 서서히 진행된다.
- shed 재료의 내후성은 장기성능에 중요한 인자인데 자외선에 의한 광분해내성은 소재종류에 크게 의존하므로 소재의 선정이 중요하다.
- 강한 방전환경에서는 어떤 유기재료도 완벽하지는 못하다.

- 표면오염과 수분에의 노출은 피할 수 없다.
  - 절연물 표면에서 물의 기여형태는 농무, 비, 결로 등 다양하다.
  - 표면방전 발생유무는 오손정도나 기후에 의존적이므로 시시각각 변한다.
  - 같은 환경조건에서 방전에너지의 크기와 열화진행 정도는 절연물 표면발수성에 기인한 물형상에 크게 의존적이다.
  - 표면재질의 미소한 변화에도 발수성은 크게 달라진다.
- 오손 물질이 표면에 축적된 상태에서 가랑비, 안개, 결로 등에 의해 습윤되면 오손물질 중에서 수용성인 것은 용해되므로 표면누설전류가 수십에서 수백배 증가하게 된다. 이런 상황이 되면 절연물 표면의 전계분포가 일정치 않고 저항이 높은 부위의 열발생이 많으므로 그 부분의 수분이 빨리 증발하여 건조대(dry band)가 형성된다. 건조대 양단에 견디기 어려운 큰 전압이 걸리게 되는 경우에는 아크방전과 더불어 많은 열과 단파장의 빛이 발생하게 된다. 더욱이 방전에너지인 열과 빛이 바로 재료의 표면에서 일어나기 때문에 표면 재질의 열화를 일으키기에 충분하다. 방전은 절연물의 표면에서 동시다발적으로 발생하는데 이러한 방전이 수없이 반복되어 재료의 열화로 인한 표면절연성능이 나빠져서 절연물 전체의 절연내력이 양극간의 전위차를 견디지 못하는 상황이 되면 섬락사고로 이어진다.

**3.2 屋外 實證試驗 設備**

애자 옥외실증시험을 위해 구축된 시험장은 시험용애자를 설치하기 위한 절탑과 운전전압을 인가하기 위한 내압기, 그리고 포설환경을 관찰하기 위한 환경측정장치와 애자의 표면상태를 관찰하기 위해 설치한 누설전류 측정장치로부터 취득된 데이터를 처리할 수 있는 측정실로 구성되었다. 그림 2는 옥외실증시험을 위한 모의 포설의 개념도로서 현수 및 내장애자장치의 오손정도를 파악하기 위하여 수직,



< 환경-누설전류 측정 시스템 개념도 >

그림 2. 누설전류 측정시스템

수평으로 애자런 설치가 가능하도록 하였으며 154kV 송전 선로의 상전압인 90kV의 시험전압을 인가하였으며 기존의 자기애자와의 오손특성 비교를 위하여 자기애자를 고분자 애자의 취부길이와 거의 같은 길이인 11개를 1련으로 하여 2련 설치하였다.

한편, 시제품의 표면 열화정도를 파악하기 위하여 표면누설전류를 측정함과 동시에 온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속, 강수량, 태양광량 등의 환경변수를 동시에 계측 및 데이터 처리할 수 있도록 환경-누설전류 계측시스템을 구성하였다.

환경-누설전류 측정은 설치된 애자의 표면에 전극을 설치하여 애자표면에 흐르는 누설전류를 매 5분 간격으로 측정저항으로부터 측정하여 증폭회로와 필터를 거친 후 전류의 피크치와 평균치로 구분하여 처리한 후 A/D 변환시켜 RS232C 통신 Port를 통해 데이터 취득시스템 (DAS ; Data Aquisition System)으로 전달된다. 이때 별도로 설치된 환경측정장치로부터 환경정보(온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속, 강수량, 태양광량)도 함께 데이터 처리되어 취득된 환경 데이터와 연계되어 환경상태가 애자의 성능에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 설계하였다. 또한 이렇게 처리되어 저장된 데이터는 원격리에서도 monitoring이 가능하도록 구성하였다.

### 3.3 送電用 애자의 屋外實證試驗 및 結果分析

#### 3.3.1 시험장의 오손도 측정

1993년 12월 고창 실증시험장에 설치하여 1994년 1월부터 현재까지 애자오손량을 측정하고 있으며 '98년 1월 4일부터 '98년 12월14일까지의 ESDD 측정결과를 그림 3과 같다. 765kV 시험장이 해안가에 위치한 관계로 염분을 포함한 습한 바람에 의해 시험선로의 애자, 금구류, 전선 등에 염분이 부착되어 오손 코로나 방전을 발생시켰으며, 통상적으로 애자오손은 우기인 여름철에 증가염분부착밀도가  $0.02\text{mg}/\text{cm}^2$  이하의 낮은 오손상태를 보여 강우시 자연 오손세정효과를 알 수 있으나, 건조하고 바람이 심할 뿐아니라 상대적으로 비가 적게 내리는 동절기부터 이른 봄까지, 10월

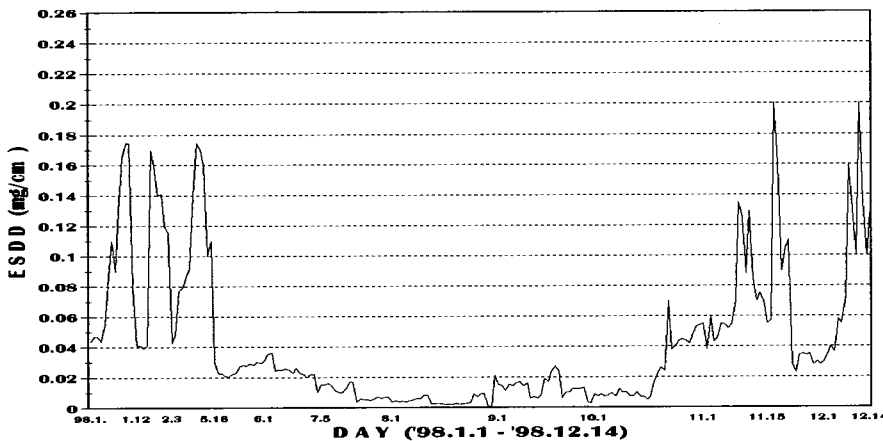
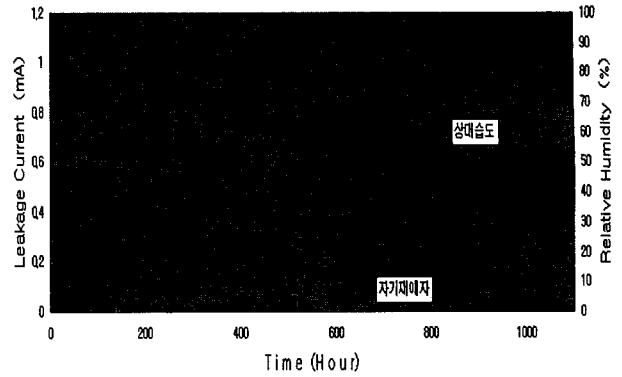
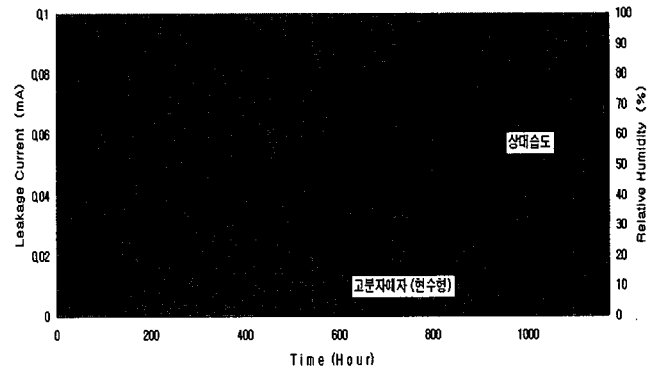


그림 3. 고창 실증시험장의 ESDD 측정치 추이



(a) 고분자 애자



(b) 자기제 애자

그림 4. 애자의 습도에 의한 누설전류의 변화

에서 4월 사이에는 염분부착밀도가 최대  $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$  까지 도달하여 오손정도가 C지역인 중오손지역임을 알 수 있었다.

#### 3.3.2 습도변화에 따른 누설전류

그림 4는 상대습도에 따른 고분자애자와 자기애자의 누설전류 특성변화를 보여주고 있다. 고분자애자와 자기제애자 공히 상대습도의 증감에 비례하여 표면누설전류가 증감되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 자기애자의 누설전류치는 고분자애자에 비하여 훨씬 더 습도변화에 민감하게 반응하였다.

#### 3.3.4 風速에 의한 表面漏泄電流의 變化

그림 5는 풍속에 대한 고분자애자의 표면누설전류치의 변화를 나타낸 것으로서 풍속이 셀수록 상대적으로 누설전류가 적어졌는데 이로부터 바람에 의한 애자의 자연세정효과가 있음을 알 수 있다.

## ⚡ 전력용 애자의 특성 및 옥외 실증시험 ⚡

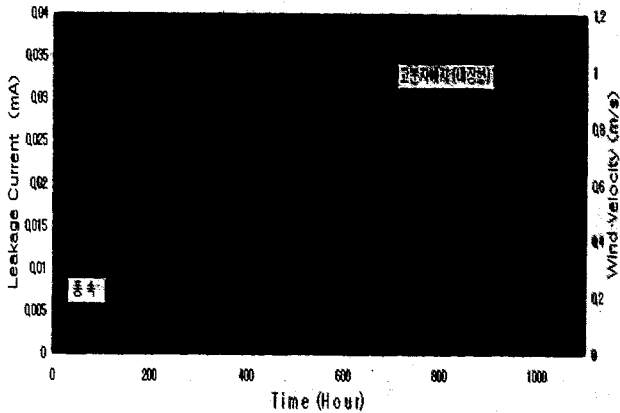


그림 5. 風速에 의한 高分子애자 누설전류 변화

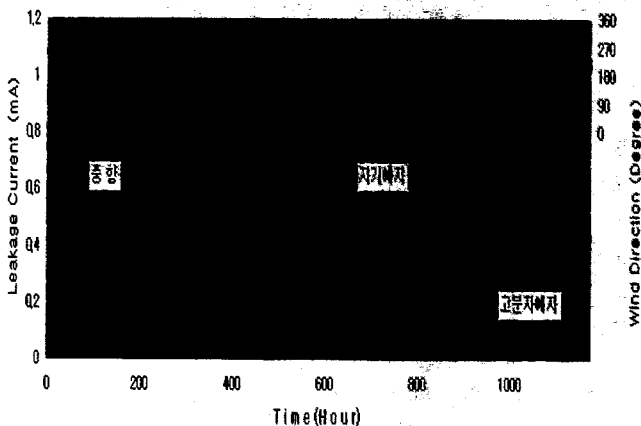


그림 6. 風向에 의한 누설전류 변화

### 3.3.4 風向에 의한 表面漏洩電流의 變化

그림 6은 풍향에 따른 애자의 누설전류변화량으로서 그림에서 풍향곡선의 0°와 180°는 각각 북풍과 남풍을 의미하며 90°와 270°는 각각 동풍과 서풍을 의미한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 270°에서 0° 사이에 누설전류가 크게 증가하는 특성을 보이는데 이는 북서쪽에 바다가 위치하기 때문이다. 즉, 해수의 미립자가 공기중에 비산되어 애자 표면에 부착하였기 때문이다. 이상과 같이 환경변화에 따른 애자의 표면누설전류 변화를 살펴본 결과 자기애자에 비해 고분자애자는 환경변화에 대한 훨씬 안정된 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 4. 結 論

애자는 전력설비, 특히 송배전선로에서 선로의 안정운전에 가장 필수적인 자재중에 하나이다. 지금까지 송전용 154 kV급까지만 국산화 되어 있으며, 국내 애자의 주류는 자기애자이다. 그러나 최근에는 고분자 소재의 애자에의 응용은 최근 관련기술분야의 비약적인 발달과 함께 고분자 애자의 사용이 증가되면서 고분자 애자는 고강도화, 고기능

화로 차세대 송배전 지지물로서 그 위치를 넓혀가고 있으나 고분자의 열화 특성을 중심으로한 장기 신뢰성여부는 향후 장기 시험과 연구를 통하여 검증하여야 할 사항이다. 국내에서도 배전용까지는 고분자애자의 사용이 증가되고 있으며, 송전용은 154 kV까지 수입품을 시사용하고 있는 상태이지만 국내에서도 154 kV까지 국산화 개발을 완료한 단계에서 본문에서 서술한바와 같이 기존의 자기애자와 비교하면서 옥외 실증시험중에 있다. 345 kV 이상급에서 송전애자 국산화는 자기애자는 물론이고 고분자애자 개발을 통하여, 전량 수입에 의존하고 있는 345 kV와 765 kV 송전애자의 국산화를 물론 기존 애자의 품질향상을 이룩하여야겠다.

### 참고문헌

- [1] "송전용 고분자애자의 제조기술 및 열화시험기술 개발 보고서", 한국전력공사의 (1999. 2)
- [2] "かゝいし", 일본전기학회(1983, 5)
- [3] "초고압송전에 관한 III단계연구 보고서", (1999. 5)
- [4] R. S. Gorur, et al., "Aging in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, No.2, pp 525-538, 1992
- [5] S. Shihab, "On-Line Pollution Leakage Current Monitoring System", RMIT, Australia, 1994

## 저 자 소 개



### 이동일(李東一)

1958년 3월 15일생. 1996년 9월 한양대 전기공학과 박사 학위 취득. 1978년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 책임연구원. CIGRE SC22-14 위원. IEEE 정회원. 주관심분야: 초고압송전 및 전기환경



### 김정부(金正夫)

1943년 11월 14일생. 1990년 서울대 전기공학과 박사 학위 취득. 1971년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 전력계통연구실장. IEEE Senior Member. CIGRE SC22 위원. 주관심분야: 절연협조 및 전기환경