

# 옥외용 고분자 절연물의 개발 동향

한국전기연구소  
절연재료연구팀  
한동희, 강동필

## 1. 서론

특수하게 합성된 전기전도성 고분자를 제외한 거의 모든 고분자는 저항이 크고 절연파괴강도가 높으며 유전손실이 작고 기계적 강도가 우수할 뿐만 아니라 대량생산이 가능하여 전기절연재료로 값싸게 이용할 수가 있다. 다만 고분자는 탄소를 골격으로 하는 유기물질이라 대체로 열에 약하고, 내후성과 내트래킹성이 좋지 않다는 단점을 가지고 있으므로 열가소성 고분자보다는 열적, 기계적 특성이 우수한 경화성 수지들을 복합화한 composite들이 전기절연물 분야에 주로 사용되고 있다. 고무를 포함한 경화성 수지들은 여러종류의 첨가제 혼합이 가능하므로 물성제어의 폭이 넓어 옥외에서 사용가능한 몇종 안되는 기초수지를 가지고도 다양한 기능의 복합재료들을 만들 수가 있다.

전기절연물에 요구되는 재료의 무결점 성형조건을 충족시킬 수 있는 가공기계 설비들이 첨단화 되고, 옥외 신뢰성이 좋은 실리콘, EPDM, XLPE, cycloaliphatic epoxy, 불포화폴리에스테르, 아크릴계 등

의 고분자소재들이 고분자 제조기술의 발달로 개발되면서 20년 이상의 옥외 신뢰성이 요구되는 전기절연물 분야에 이들 소재의 적용이 가속화 되고 있다. 다만 장기특성의 예측을 위한 단기특성평가기술이 고분자 재료의 특성상 쉽지가 않으므로 현장적용이 다소 조심스러웠으나 20년에 가까운 현장적용의 결과가 소재에 따라 특성이 다소 차이는 있지만 우수한 것으로 평가되고 있다.

## 2. 옥외용 절연물의 절연성능

옥외 절연물은 10년에서 50년 정도로 사용 기간이 길고 기계적, 전기적 stress를 항상 받고 있을 뿐만 아니라 사용 환경(도심, 공업지역, 해안 등)에 따라 오염 물질의 종류와 오염 정도에 차이는 있지만 오염 물질에 노출되는 것을 피할 수는 없다. 절연물의 절연 성능에 영향을 주는 인자로는 절연물의 형상, 오손 정도, 오손 물질의 종류, 절연물의 표면재질, 표면에서 오손액(물)의 유동성, 물의 형상 등이 있다.

사용중인 절연물의 섬락사고에는 오손물과 물이

결정적인 기여를 한다. 절연물의 표면을 통하여 흐르는 누설전류는 오손물질의 종류, 양, 오손정도에 따라 다르지만 오손이 심할 수록 누설전류값이 건조 상태에서 보다는 젖어 있는 상태에서 훨씬 크므로 표면의 젖음성(wettability)이 매우 중요하다.

표면에서의 물은 표면의 재질에 따라서 필름형태로 퍼지기도 하고 drop형태로 뭉치기도 한다. 물의 표면에너지는 73 dyne/cm로서 porcelain이나 glass 재질의 표면에너지보다는 작고 유기 고분자의 표면 에너지보다는 크다. 따라서 porcelain 표면에 있는 물은 필름 형태로 퍼지며 고분자 표면에서의 물은 drop 형태로 뭉친다.

젖음성의 정도는 일반적으로 접촉각을 측정하여 나타낸다. 고분자 물질의 표면에너지는 대부분 물보다 낮아 그 표면에 있는 물은 drop 형태로 되어 접촉각이 90° 보다 크지만 고분자 물질의 종류에 따라서도 표면에너지값이 다르며 따라서 접촉각도 다르다. 절연물과 관련된 재료들의 표면에너지를 <표-1>에 정리하였다. 고분자는 대부분 hydrophobic한 표면을 가지고 있다. 옥외 고분자 절연물의 shed용 소재로 사용되는 EPDM과 실리콘 고무의 표면에너지는 각각 34, 22 dyne/cm로서 물과의 차이가 큰 실리콘 고무의 접촉각이 더 크다. 즉 실리콘 고무의 발수성이 더 좋다고 말할 수 있다.

<표-1> 절연물과 관련된 재료들의 surface Energy

Materials	Surface Energy(dynes/cm)
H2O	73
General polymers	30~60
Epoxy	34~46
EPDM	34
EP rubber	33
PE, PP	32
Teflon	23
Organic liquids	20~40
Silicone(PDMS)	20~23
Silicone fluid	17~19
gases	0~10

사용중에 재질의 화학적 변화가 수반되는 상황에서 발수성이 어떻게 변할 것인가 하는 것은 절연물의 장기적인 신뢰성과 밀접한 관계가 있다. 많은 고분

자들 중에서 실리콘만이 심한 오손상태에서도 표면 발수성을 잘 유지하며 방전으로 인한 열화가 일어난 다하더라도 쉽게 발수성을 회복하므로 현재까지 알려진 가장 우수한 shed용 소재로 인정되고 있다

사용중인 절연물의 절연내력이 규정치 이하로 떨어져 발생하는 사고를 방지하려면 기본적으로 충분한 누설거리가 필요하다. 그렇지만 오손 물질의 종류와 오손 정도 그리고 물의 기여 양상에 따라 사용 중인 절연물의 절연내력이 크게 떨어지므로 절연물의 설계와 전체적인 크기의 결정은 쉬운 일이 아니며 설계통에서 이와 관련된 절연물의 사고는 계속되어 오고 있다.

### 3. POLYMER INSULATOR의 종류

많은 종류의 고분자 절연물들이 개발되고 있는데 절연물의 명칭이 다양하게 사용되고 있다. 분자량이 큰 유기물질을 통칭하여 고분자(polymer)라고 말하며 thermoplastic, thermoset, rubber를 모두 포함하는 명칭이다. 기계적 강도보강이나 기능성을 부여하기 위하여 다른 재료를 첨가할 경우 복합재료(composite)라고 명하지만 기계적 강도보강을 목적으로 fiber를 첨가하였을 경우를 주로 composite라고 부른다. 성형상의 어려움 때문에 fiber의 첨가는 극히 제한되어 있으며, 대개 불포화폴리에스테르나 에폭시 같은 열경화성 수지에 다량의 무기물분말을 혼합하여 경화시키게 되는데 이것을 resin concrete라고 한다.

#### 1. composite insulator

인발(pultrusion)공법으로 glass fiber와 수지를 결합시켜 고강도 FRP봉을 만들 수가 있다. 이 봉의 주위에 실리콘 고무 또는 EPDM 고무된 shed를 씌우는데 규모가 큰 송전용 insulator는 고무 shed를 금형에서 찍어 조립하는 방법을 택하고 규모가 작은 배전용은 FRP봉을 금형 안에 넣고 한번에 여러개의 shed를 사출성형한다. 그리고 양쪽끝에 금구류를 부착하여 제작이 완료되며 아래와 같은 많은 장점을 가지고 있다.

- ① 우수한 기계적 강도 : 인장강도는 자기질의 2배, 충격강도는 5배 정도로 우수함.

- ② 경량 : 자기질의 15% 내외이므로 생산, 보관, 운반, 설치 등이 용이함. 선진국이 될수록 경과지가 산악 및 해안 지역이 되며 인건비가 높으므로 철탑 하나에 수 ton의 절연물이 설치되는 것을 감안하면 매우 큰 장점이 되며 충격강도가 우수한 것은 운반 및 설치시 더욱 유리한 인자가 된다.
- ③ 우수한 내오손 특성 : 유기 물질은 무기 물질에 비해 surface energy가 낮는데 이 경우 표면에 물이 존재하면 퍼지지 않고 방울로 뭉쳐 쉽게 굴러 떨어지며 오손상태에서 표면 누설전류값을 낮게 유지시켜 준다. 태풍이 잦고 섬과 염해공단이 많은 우리나라에서 더욱 큰 효과를

- 기대할 수가 있다.
  - ④ 대량 생산 및 긴급 제조 가능 : 고분자 가공용 기계가 크게 발전하여 생산성이 좋고 2일 정도면 완제품의 제조가 가능하며 생산시 에너지 소모가 적어 가격이 저렴하다.
  - ⑤ 설계 가변성 우수 : 고강도 FRP rod와 내충격성이 좋은 고무를 사용함으로 얇고 가늘게 제작이 가능하며 또한 누설거리 확대가 용이하여 특성이 우수한 절연물 제작이 가능하다.
  - ⑥ 재질의 특성상 폭발하지 않으므로 파편의 비산으로 인한 2차 사고도 없음.
- 이런 방식의 고분자 절연물을 만드는 국외의 회사들을 <표-2>에 나타내었다.

<표-2> 국외 옥외 절연물 제조회사

회 사 명	소 재 지	shed 소재/절연물	비 고
Lapp Co.	Le Roy, New York USA	EPDM, 실리콘고무/고분자 arrestor, 송배전용 절연물	1976년 생산시작
Ohio Brass	Masusfield, Ohio USA	EP고무, 실리콘고무/고분자 arrestor, 송배전용 절연물	1976년 생산시작 1976년 시설증설
Sediver Inc.	York, South Caro-lina, USA/France	EPDM/송배전용 절연물	1976년 생산시작
Reliable	Chicago, USA	EPDM, 실리콘 고무/송배전용 절연물	1976년 생산시작 1988년 시설증설
NGK	Baltimore Maryl and, USA	EPDM/송배전용 절연물	1980년 생산시작
A.B. Chance	USA	송배전용 절연물	
Salisbury	USA	송배전용 절연물	
Ceram Tech.	Germany	송배전용 절연물	

2. polymer concrete insulator

경화성 수지에 다량(80%)의 무기물 보강제를 첨가하여 복합화 하고 수지를 경화시키면 아주 딱딱하게 굳어지는데 이런 소재를 사용하여 만든 절연물을 고분자 콘크리트 절연물이라고 한다. 무기물을 이렇게 다량으로 첨가하는데는 여러가지 이유가 있다. 첫째, 기계적 강도, 특히 충격강도를 향상시키기 위함이고 둘째, 수지의 경화시 수반되는 부피감소를 최소화하여 정밀성형물의 제조시 부피 축소에 따른 문제점을 줄이고 셋째, 수지보다 값이 싼 무기물 보강제를 첨가하여 생산원가를 줄이며 넷째, 전기재료로서 요구되는 여러가지 특성을 보강하기 위함이다.

진공하에서 수지와 보강제를 혼합하여 금형에 주

입한 뒤 경화를 시키며 금형에 주입시 조밀한 packing을 위해 vibrator를 사용한다. 제조공정이 간단하고 아주 복잡한 형태의 성형물도 만들 수가 있으며 electrode나 end cap 등을 절연물 내부에 심어서 주형할 수도 있는 장점도 가지고 있다. 이와같은 고분자 절연물의 제작을 위해 사용되는 수지의 대부분이 내후성과 내트래킹성에 다소의 문제점을 가지고 있으므로 옥내 지지용 insulator, 기기용 bushing 등에 주로 사용되고 있다. 최근 내후특성이 좋은 cycloaliphatic epoxy나 acryl계 수지가 개발됨으로써 옥외용 지지에자 및 현수에자가 실용화되고 있다.

고분자 콘크리트 절연물의 개발은 미국의 EPRI가 주축이 되었으며 Syn Technics, Inc.(Memphis Tn, USA)와 Lindsey Manufacturing Co.(Azusa, Ca.

USA)가 개발에 성공하여 polysil insulator라고 하여 영업 중이다.

polymer insulator를 생산중이거나 개발중인 국내의 기업현황을 <표-3>에 정리하였다.

<표-3> Composite and concrete insulators to be used or on development in Korea

Insulators	Materials	Related Co.	Remarks
Outdoor composite Insulator	Silicone rubber	Gold Star Cable Co., Ltd. Bo Sung Electric Co., Ltd. Cheryong Industrial Co., Ltd. Shin-A Electric Ind. Co., Ltd. Kun Hwa Electric Ind. Co., Ltd. Kyung Dong Electric Co.	on development
	EPDM rubber	Pyung Il Industrial Co., Ltd.	on development
	Cycloaliphatic epoxy	Tongyang Nylon Co., Ltd. Morgan Korea Ltd.	on development
	UPE compound	Kwang Myung Electric Ind. Co., Ltd.	on development
Indoor Post Insulator	Epoxy compound	Hanil Electric Sources Ind. Co., Ltd Kyung Dong Electric Co.	to be used
	UPE compound	Kwang Myung Electric Ind. Co., Ltd.	to be used
Indoor Bushing	Epoxy compound	Hanil Electric Sources Ind. Co., Ltd	to be used
	UPE compound	Kwang Myung Electric Ind. Co., Ltd.	to be used
Cable head	Silicone rubber	Kyung Dong Electric Co. Bosung Moosan Co., Ltd	to be used
	EPDM rubber	Pyung Il Industrial Co., Ltd.	to be used

### 3. polymer arrester

에자 및 COS와 더불어 파괴되는 오손사고가 많은 3대 절연물 중의 하나이다. 애관 대신 polymer housing을 사용하면 오손특성이 향상되고 폭발시 비산하지 않으며 정밀가공이 용이하여 sealing도 잘 된다. 따라서 흡습에 의한 소자의 열화가 거의 일어나지 않으므로 신뢰성이 우수하다. 1980년대초에 영국에서 최초로 개발되었고, 85년 미국의 Ohio Brass사와 92년도 일본의 Otowa사가 상업화하여 영업중이다. 국내에서는 신아전기가 조립생산중이며 건화전기도 개발중에 있다.

### 4. polymer bushing

변압기, 차단기, 개폐기, recloser 등의 전기기에 사용되는 bushing도 고분자소재로 제작이 가능하며 옥내 전기기기용으로 polymer concrete소재를 사용한 bushing이 개발되어 사용중에 있다. 그러나 polymer concrete 소재가 옥외환경에서 완전하지가 못하여 옥외용으로는 거의 사용되지 않을 뿐만 아니라 기계적 강도가 fiber로 보강된 composite보다 약

하여 대형인 초고압 bushing의 소재로는 적절하지 못하다. 최근 미국, 구소련, 중국, 독일 등에서 composite를 이용하여 154kV급 이상의 대형 bushing이 개발되고 있다. 국내에서는 아직 개발이 이루어지고 있지 않다.

## 4. 옥외용 고분자 절연물의 평가

고분자 절연물의 장기특성, 즉 신뢰성의 문제는 고분자 표면의 열화와 기계적 failure에 기인된다.

고분자는 열에 약한 탄소로 되어 있고 재질내부로 산소나 수분의 출입이 가능하여 산화에 완전하지 못하다는 근본적인 한계를 가지고 있지만 이러한 고분자 자체의 한계특성들도 복합화에 의해 크게 향상시킬 수가 있기 때문에 같은 고분자 소재라 하여도 장기특성은 상당히 차이가 날 수 있다. 따라서 자연 환경과 전기적 스트레스하에서 고분자의 열화 mechanism을 이해하고 단시간에 제품의 장기수명을 예측 위한 가속열화 평가시험법의 개발이 필요하다.

평가를 위한 시험기간이 6개월이상을 초과해도 비현실적이고 열화조건이 지나치면 현장에서 30년이 지나도 일어나지 않을 변화를 유발시킬 수가 있기 때문에 세심한 주의를 필요로 한다. 소재자체의 열화중 자외선 및 산소(수분)에 기인한 열화는 weather-ometer를 사용하고 흡습된 오손조건에서의 전기적 스트레스에 기인한 열화는 트래킹 방법을 사용한다. 규격화된 트래킹 방법은 IEC 112와 IEC 587

(경사평면법)이 있으며 전자는 열화조건이 약하여 주로 옥내용 절연물평가에 사용되며 후자가 옥외용 절연재료의 열화시험법으로 많이 이용되고 있다. 그 외에도 옥외절연재료의 열화시험법으로 규격화과정중에 있는 RWDT(rotating wheel dip tester; 일명 MGR 이라고도 함)가 제품의 장기특성을 예측할 수 있는 우수한 방법인 것으로 인정받고 있다(그림-1).

기계적인 문제는 이종재질간의 접합기술과 기계적, 열적 피로에 의한 열화에 기인된다. 장기특성도 전자에 크게 기인할 것으로 보이며 소재의 특성을 이해하고 제작시 접합방법이나 기술에 많은 배려가 있어 할 것이다. 기계적 스트레스가 가해진 상태에서 온도 cycle시험을 하면 장기특성예측이 가능할 것이다.

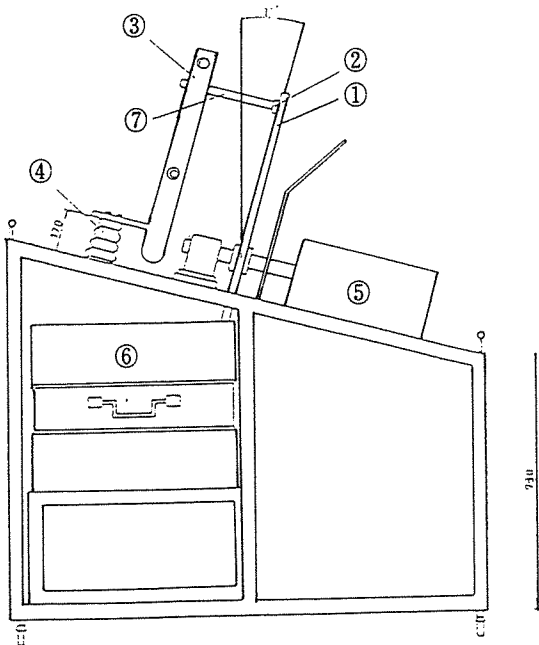
제품을 검정하는 시험규격은 1989년 제정된 ANSI C29. 11-1989와 1992년 제정된 IEC 1109가 있다.

### 5. POLYMER INSULATOR의 전망

유럽은 1970년도 그리고 미국은 1975년도 부터 상업화되기 시작하여 15-20년 정도 field에서 사용하고 있으며 특성이 좋아 사용량이 꾸준히 증가하고 있다.

- 배전용은 polymer insulator로 거의 대체되어 갈 것으로 예상된다.
- 송전용도 머지 않아 50% 정도는 대체될 것으로 본다.
- 배전용 피뢰기도 선진국을 중심으로 점진적으로 개발되고 있다.
- 초고압 bushing도 composite 소재화하는 연구가 진행중이다.

특히, 우리나라는 삼면이 바다이고 해안공단이 많아 내오손성이 좋은 고분자 절연물의 사용이 기대된다.



- ① Rotating Wheel : 시료를 취부하여 회전한다.
- ② 시료취부 Holder
- ③ 고전압 인가 전극,
- ④ 고전압 인가 지지 절연물
- ⑤ Wheel 회전용 D.C. 모터
- ⑥ 염수용액 750 Ωcm
- ⑦ 시 료(길이 30mm, Ø 26mm).

〈그림-1〉 R.W.D.T. tracking 실험장치