

배전급 고분자 현수애자의 제조기술 개발  
Manufacturing Technique of Suspension Insulator for Distribution Lines  
Using Composite materials

홍진영\*, 김영성, 지응서, 김영찬, 백주흠, 김동욱  
LG전선 전력연구소

J.Y. Hong\*, Y.S. Kim, E.S. Ji, Y.C. Kim, J.H. Baek, D.W. Kim  
High Power Technology Center, LG Cable & Machinery Ltd.

Abstract

In this paper a series of developing process for an insulator which can be employed in overhead distribution lines, using polymeric composite materials, is introduced.

In order to design an insulator for heavily polluted area, weathershed of alternating type was adopted, which could have longer leakage distance. Modified EVA was used as surface material which has good electrical and mechanical characteristics as well as superior chemical stability. FRP core was covered with above surface material through heat shrinking process. By standardization of each process, higher productivity and lower production cost could be ensured.

The developed insulator has been put under various tests including long-term field test and artificial aging test and satisfactory results were obtained.

1. 서론

최근의 급격한 산업의 발달로 인한 전기에너지 소비증가는 더욱 안정적인 전력공급을 요구하게 되었고, 이를 위해 공해에 의한 오염지구 및 해안근처의 염해지구 등 오손이 심한 지구에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있는 보다 신뢰성 있는 절연물에 대한 요구가 증가되고 있다. 가공선로에서의 전기적 절연을 담당하는 애자의 경우 기존의 무기질 자기재료를 이용한 애자를 대체한 고분자 합성물질을 이용한 신소재 애자의 개발이 전세계적으로 수행되고 있다. 고분자애자는 자기재 애자에 비해 월등한 발수성에 의해 내오손특성과 내트래킹성이 좋으며 성형성이 좋아 동일한 절연거리에서도 많은 누설거리를 확보할 수 있고 기계적으로도 깨어짐특성이 좋고, 무엇보다도 경량화가 가능하여 설치 및 유지 보수 비용절감 등의 여러 가지 장점들을 지니고 있다. 또한 상대적으로 취약점으로 여겨지던 내후특성에 있어서

도 컴파운드의 처방기술 향상으로 자기재료의 동등 수준까지 도달함으로써 향후 애자시장의 고분자 애자화는 필연적이라 할 수 있다. 애자업계의 국제적 추세에 있어서도 미국의 경우 이미 20 여년전 부터 고분자 애자가 개발, 제조되고 있으며, 유럽의 경우 수년전 고분자 애자 공동 규격을 제정하였고 국가규격을 제정하는 등 애자시장의 고분자애자로의 전환하려는 노력이 활발히 진행 중이다. 또한 그 나라의 기후, 환경조건 등을 고려하여 적합한 평가기술을 개발하기 위한 연구가 우수기관에서 수행되고 있으며 규격화의 움직임이 활발히 진행되고 있다[1]

본 연구에서는 선진업체들의 국내 침투에 대비하여 기반기술 확보를 통한 경쟁력 강화의 일환으로 국제적 추세인 고분자 절연재료를 기본으로 한 22.9kV급 배전용 현수애자를 개발하였으며 그 설계 및 제조기술 그리고 평가에 이르는 일련의 개발과정을 소개하고자 한다.

## 2. 배전용 고분자애자의 설계

고분자 애자는 내부절연과 기계적 응력을 감당하는 FRP 심재(Core), 또 심재를 보호하고 외부 절연누설거리를 확보하는 기능을 가진 외피부의 최소 2부분의 절연부와 양단에 연결용 금구를 접속한 형태의 애자이다.

### 2-1 절연부의 설계

일반적으로 애자의 절연 설계시 핵심사항으로 표면 누설거리와 건조섬락거리 그리고 애자 갓의 형상 등을 고려해서 설계해야 한다. 표면 누설거리 및 섬락거리는 컴파운드의 특성에 따라 달라지므로 내후성, 내트래킹성 등의 장기노화 시험을 통한 각종 데이터의 기준치를 설정하여 설계에 반영하였다.

인가되는 전압에 대한 표면 누설거리 (mm/kV)가 작은 경우에는 애자의 표면 오손시 국부적인 미소방전에 의한 표면열화가 발생하게 되고 누설전류가 증가하게 되어 결국 섬락사고가 발생하게 됨과 동시에 절연체로서의 수명을 다하게 된다. 그러므로 단락사고 발생시에도 재송전이 가능할 정도의 내전압 특성을 회복하기 위해서는 충분한 누설거리의 확보가 중요하다. 표면 누설거리를 결정하는 데 있어서는 애자가 사용되는 환경의 오손 레벨에 따라 최소 누설거리를 규정한 IEC 815 규격이 공히 적용되고 있으며, 본 배전용 고분자 애자의 경우 중오염지역 (공장밀집지역, 해안근접지역)의 표면누설거리 기준치인 28mm/kV에 안전율을 고려하여 설계 하였다.[3]

건조섬락거리의 경우 전력계통의 절연협조를 고려한 기준절연레벨을 기준으로 설정하게 되는데 다음은 건조섬락거리와 섬락전압 사이의 관계를 나타내고 있다.[4]

$$V \propto r^{1/3} \cdot La^{2/3} \cdot Ls^{1/3}$$

r : 단위 누설거리 당의 표면저항을 [Ω]

La : 건조섬락 거리 [mm]

Ls : 누설거리 [mm]

V : 섬락전압 [V]

한편, 갓의 형상에 있어서 IEC 815에서는 강우시 빗물에 의해 갓 사이의 교락현상을 피하기 위해 최소 이격거리를 규정하고 있다. 따라서 애자의 설계시 근본적으로 교락현상을 피할 수 있을 만큼의 충분한 갓간거리를 확보하면서도 누설거리를 최대한으로 할 수 있는 교대갓 형태(alternating type)로 설계하였다.

### 2-2 압착법에 의한 취부금구 접속부의 설계

본 연구에서는 취부금구 접속방식으로 공정이 비교적 간단하여 제품의 비용절감 및 대량생산이 가능한 압착법을 검토 하였다. 규정된 인장특성을 확보하면서도 압착시 압착흔에서의 도금층 훼손과 심재의 손상을 방지하기 위해서는 압착부의 면적, 다이스의 갓수, 단위면적당 하중 등을 고려하여 최적의 압착조건을 확립해야 한다. 본 연구에서는 8방향의 압착다이스를 채용한 전용 압착기를 제작하였으며, 압착시 심재와의 마찰력을 고려하여 금구내부를 리더가공하고 각 압착하중별로 압착한 시료의 인장시험 및 부식시험, x선 투과시험 등을 통해 압착공정을 표준화시켰다.

### 3-3 재료설계

#### 3-3-1 외피재의 선정

고분자 애자에서 외피재는 내부 심재를 보호하는 기능뿐 아니라 포설환경의 각종 스트레스를 감당하는 기능을 담당하게 된다.

외피재는 발수성, 내오손성, 내자외선성, 내트래킹성 등의 우수한 특성을 가져야 하는 한편, 고분자 애자의 외피재는 무기물인 자기재와는 달리 유기합성체이므로 장기적 사용시의 열화현상에 대비하여 화학적 안정성에 대한 고려가 있어야 한다.

고분자애자의 외피재료로는 Epoxy, Silicone, EPDM(EPR), 변성 EVA등이 개발, 이용되고 있으며 각각 옥외용 절연재료로서의 장단점을 지니고 있어 최적의 외피재 선정을 위해 세계의 우수기관에서 이들의 특성을 평가하는 각가지 시험들이 수행되고 있다. 현재 추세는 Epoxy, EPDM에 비해 발수성, 내후성 및 전기적 특성이 상대적으로 우수하다고 인정된 Silicone, EVA의 이용이 점차 확대되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 전기적, 기계적 특성이 양호하며, 내후특성, 경제성, 장기적으로 화학적 안정성을 갖춘 변성EVA 재료를 외피재로 이용하였다[5] [6]. 표 1은 본 배전용 고분자애자에 이용된 외피재의 물성을 요약한 것이다.

#### 2-3-2 FRP 심재 (FRP Core)

고분자애자의 내부 심재로 사용되는 FRP Rod는 전기적 절연성, 기계적 인장특성, 열팽창계수 등의 특성에 대한 고려가 있어야 한다. 이를 위해 구성재료인 Base 수지 및 Glass Fiber 각각의 특성과 상관관계에 대한 연구가 선행되었고 특히, 충전제의 함량과 열팽창계수와의 상관관계,

표 1. 외피재료의 물성치

시험항목	시험규격	특성치
- 인장력	ASTM D 412	15 Mpa ↑
- 신율	ASTM D 412	400 % ↑
- 절연내력 (1.5 mm)	IEC 243	220kV/cm ↑
- 체적저항	IEC 93	1013.Ωcm ↑
- 유전율	IEC 250	5.0 ↓
- 수분흡수율	ASTM D 570	0.5 % ↓

Glass Fiber의 함량, Glass Fiber와 Base 수지인 Epoxy의 계면특성 등을 고려하여 처방하였다. FRP Rod의 제조는 인발성형 (Pultrusion) 공법으로 제작하였으며, 시제작된 rod는 IEC 1109 규정에 의한 염로침투시험을 실시하여 수분침투여부를 평가한 결과 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

### 2-3-3 취부금구

고분자애자의 취부금구는 과전시 전계집중을 최소화하고 우수한 섬락특성을 갖도록하기 위하여 유한요소법에 의한 전계해석 및 형상별 섬락 실험을 통해 설계하였다. 재료로는 신율이 높고 강도가 높아 압착특성이 좋은 기계구조용 탄소강을 택하였으며, 열간 단조공법에 의해 형상을 제조하였다. 한편, 도금층의 균일성과 부착량을 확인하기 위해 KSB0201에 의한 도금시험을 실시하였다.

### 2-3-4 계면부

절연물에 있어서 이종물질간의 결합시 그 계면간의 기밀성 여부는 상당히 중요한 요소이다. 본 고분자 애자의 FRP Rod와 외피부 사이에는 Polyisobutylene 계열의 mastic을 도포하여 옥외 포설시 수분에 대한 기밀성 확보는 물론 각종 물리적 스트레스에 의해 외피부의 훼손시에도 코아로의 수분침투를 억제하도록 하였다. 또한 외피부와 금구부와의 계면에는 상온경화 실리콘을 이용하여 실링처리함으로써 수분침투를 방지토록 하였다.

## 3. 배전용 고분자애자의 제조

고분자 애자의 제조방식으로는 사출방식, 열수축 방식 그리고 프레스 모듈라 방식 등이 있는데 본 개발에서는 공정이 단순하고, 대량 생산이 가능하며 제조비용이 비교적 경제적인 열수축 방식을 채택하였다.

열수축 공정에서는 몰딩성형된 스커트부를 FRP Rod에 적용시키기 위해 진공오븐이 이용된다. 이때 예열온도, 수축 온도와 시간, 진공 타이밍,

진공도, 온도에 따른 mastic의 흐름성 등에 대한 고려가 있어야 하며 가열후 냉각시 온도변화에 따른 횡방향의 길이변환을 염두에 두고 작업을 표준화 해야 한다. 본 연구에서는 특별히 제작된 수축치구를 이용하여 rod의 적정한 부분에 skirt가 수축될 수 있도록 함으로서 양산시 생산성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

그림 1은 본 배전용 고분자애자 제조 공정의 흐름도이며 제조공정 중의 제반문제점들을 요소별로 개선, 최적의 공정조건을 확립하여 시제품을 제작하였다.

그림 2는 기존의 4개의 애자를 1련으로 연결하여 증오손 지역용으로 사용하고 있는 자기재 애자와 이에 대한 대체용으로 시제작된 고분자 애자의 비교사진과 특성치로서 제작된 고분자 애자는 자기애자에 비해 많은 누설거리를 확보하면서도 경량화 소형화를 이루고 있음을 알 수 있다.

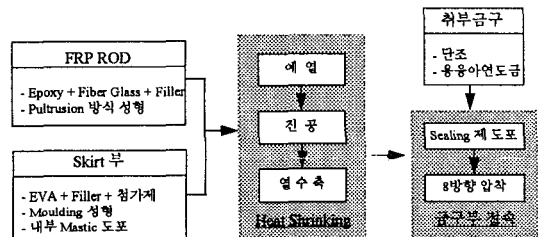


그림 1. 고분자 애자의 제조공정 흐름도

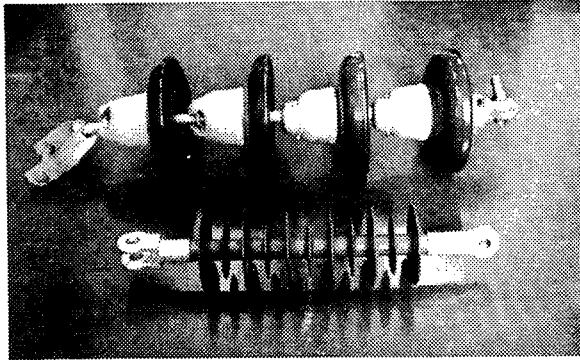
## 4. 배전용 고분자 애자의 시험평가

### 4-1 고분자 애자의 성능평가

표 2는 시제작된 제품의 특성을 한전의 배전용 폴리머애자 구매시방서의 규정치와 비교하여 나타내었다. 성능에 있어서 한전규정치를 만족하고 있음을 볼 수 있다.

표 2. 배전용 고분자애자의 성능 평가결과

항 목	한전규정치	평가 결과
상용주파 건조섬락시험 (kV)	145 ↑	150 ↑
상용주파 주수섬락시험 (kV)	130 ↑	140 ↑
뇌충격 섬락전압시험 (kV)	정	225 ↑
	부	275 ↑
전파장해 전압 (μV @ 25kV)	10 ↓	3 ↓
규정 인장하중 (kg)	7	10 ↑
인장 내하중 (kg)	3.5	O.K.
누설거리 (mm)	760 ↑	940
건조섬락거리 (mm)	320 ↑	380
총 길이 (mm)	525 ± 55	508 ± 5



	구분	용도	총길이 (mm)	누설거리 (mm)	중량 (kg)
상	자기재 애자	중오손 지역용	148 X 4 = 584	210 X 4 = 840	3.4 X 4 =13.6
하	고분자 애자	중오손 지역용	508	940	1.2

그림 2. 시제작된 고분자애자와 자기재 애자의 비교

#### 4-2 모의 가속열화 특성

가공선로용의 배전용 애자는 포설후 운전되는 기간동안, 자외선, 습도, 온도변화와 여러 오염 물질에 노출되는 환경적 열화를 받음으로 이에 따른 시험평가는 필수적이다. 본 연구에서는 제작된 시제품의 장기적인 신뢰성 평가를 목적으로 그림 3과 같이 RWDT (Rotating Wheel Dip Test) 법의 트래킹시험을 실시한 결과 30,000cycle (약

68일) 동안 트래킹이나 침식(erosion)이 발생하지 않았고, 누설전류도 40 mA 이하로 양호한 특성을 얻을 수 있었다. [7]

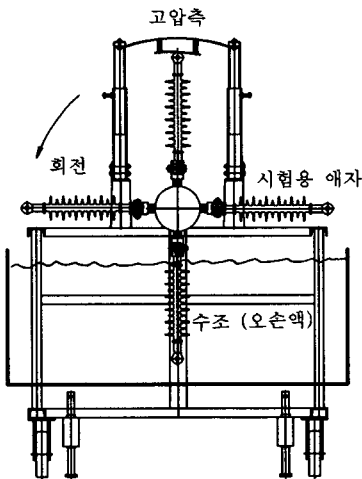
또한 CEA LWIWG-01규정에 의한 수분침투시험을 실시하였으며 표 3은 시험방법 및 결과를 요약한 내용이다.

표 3. 고분자 애자의 수분침투시험

시험순서	시험기준	시험결과	
1. 건조섬락시험	145 kV ↑	150 kV ↑	
2. 경도측정	-	95	
3. 굽임	-	-	
4. 판 정	외관검사	균열, 부풀음이 없을 것	양호
	경도측정	20% 이상 변화 없을 것	양(7%↓)
	급준파	절연체의 파기가 없을 것	양호
	상용주파	굽임전의 섬락치의 90%	양호
	건조섬락	이상일 것	(93% ↑)
내전압	섬락이 일어나지 않을 것	양호	

#### 4-3 장기 옥외 실증시험

본 연구에서는 실제통과 같은 상황에서 고분자 애자를 시험평가하기 위해 옥외시험장을 구축하였다. [3] 이 옥외시험장에는 애자의 포설상태에 대한 오손상황을 파악하기 위하여 수직, 수평으로 포설이 가능하도록 하였으며 실사용 전압의 약 130%에 해당하는 30 kV의 전압을 인가하였다. 또한 오손의 가속화를 위해 염무 분무장치를 설치하였으며 표면열화 추세를 파악하기 위하여 장기누설전류를 상시 측정하였고 발수성 변화도 관



- 그림 3. RWDT 시험장치 및 시험조건
- 4 단계 시험조건 : Energized Period, Cooling Period, Dip Period, Drip Priod (40 초동안 정지, 8 초동안 다음 단계로 이동)
  - 인가전압 : 35V/mm(누설거리)
  - 오손액 : 1.40 ± 0.06g/l NaCl 을 증류수에 희석
  - 시험시간 : 30000 cycle 이상

할하였다. 그림 4는 옥외시험장에 포설된 고분자 애자의 전경 사진이다.

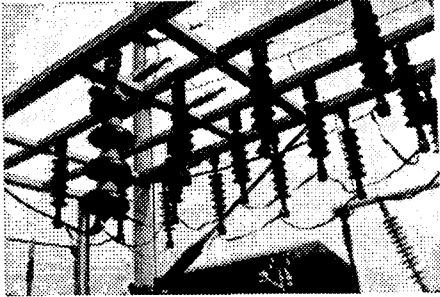


그림 4. 고분자 애자의 장기실증시험장 전경

그림 5와 그림 6은 약 6개월 간에 걸쳐 측정된 누설전류치와 접촉각으로서 특별한 표면열화 없이 안정된 특성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

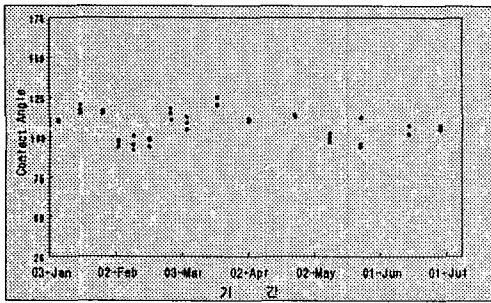


그림 5. 장기 접촉각 변화 측정결과

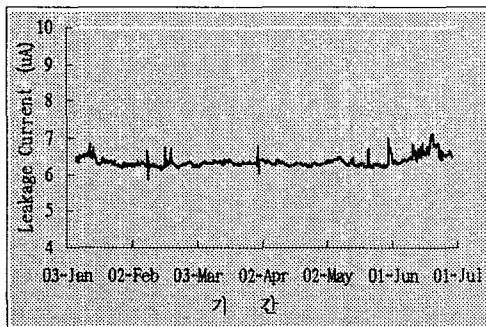


그림 6. 장기 누설전류 측정결과

## 5. 결론

본 연구에서는 가공 배전선로에서 사용되고 있는 기존의 자기재 애자의 대체용도로써 유기합성 물질을 이용한 고분자 애자를 개발하였다.

배전용 고분자 애자의 제조공법으로는 열수축 공법과 금구접속을 위해 압착공법을 채택하였고 제조공정 및 접속기술의 표준화를 확립함으로써 생산성 향상과 생산비용 절감을 이룰 수 있었다.

개발된 고분자 애자는 기존의 자기재 애자에 비해 1/10 정도로 경량화를 이루었으며 성능에 있어서도 한전구매규격을 만족하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 성능의 장기적인 신뢰성을 확인하기 위하여 오손환경을 모의한 가속열화시험을 실시하였으며, 실선로와 동일한 환경의 옥외시험장에서의 장기실증시험을 통해 장기적으로 안정된 성능을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.

이와 같이 배전용 고분자 애자의 제조공정 개발을 통해 축적된 기술과 경험은 송전용 애자, 초고압 부싱 등 각종 절연기기류의 고분자화 대체 개발과 사업화에 응용될 수 있을 것으로 사료되며, 향후 수입개방에 따른 외국 선진업체의 국내진출에 대비한 국내 관련 산업의 입지확보에 크게 기여하리라 기대된다.

### [참고문헌]

- [1] W. T. Starr, "Polymeric Outdoor Insulation", IEEE Trans. EI, Vol. 25, No. 1, pp. 125-136, 1990
- [2] H. Dietz al., "Latest Developments and Experience with Composite Longrod Insulators", CIGRE 15-09, 1986
- [3] "Guide for the selection of insulators in respect of pollution conditions", IEC 815, 1896
- [4] "International studied of insulator Pollution Problems", CIGRE 33-12, 1970
- [5] W. Xinsheng al., "Influence of Acid Rain on the Leakage Current of Insulator Surface", 日本 電氣學會 全國大會, 平成 8年
- [6] R. S. Gorur al., "Contamination prformance of Polymeric Insulating Material used for Outdoor Insulation Applications", IEEE Tras. on E. I., vol. 24, No. 4, 1989
- [7] "Dead-end / Suspension Composite nsulator for Overhead Distribution Lines, CEA, 1991