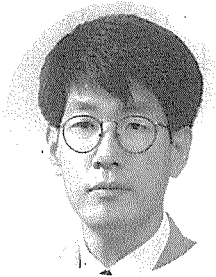


## 가공 선로용 고분자 애자의 개발동향과 활용



LG 電 線 (株)  
전 력 연 구 소  
부소장 박 완 기

### 1. 개요

최근 산업시설의 증가로 인해 가공 송배전선로의 운전환경이 점점 열악해지는 상황에서 급격히 증가하고 있는 전력수요를 양질의 안정적인 전력 공급으로 대응하기 위해서는 보다 신뢰성 있는 절연물의 개발이 필연적이다.

지금까지 국내 가공 선로용 절연물로서 사용되고 있는 자기재 애자는 전기 절연성능이 우수하고, 내후성에 장점을 지니고 있으나 무거운 중량으로 인한 운반, 설치의 어려움과 저인장 강도, 물리적 충격에 약한 단점을 지니고 있을 뿐 아니라 소결시 부피 감소가 커서 초고압용 대형 절연물의 제작이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 또한 재질의 친수성 때문에 수분과 염진해 등으로 인한 표면 오손상황에서 절연특성이 현저히 저하되는 단점을 지니고 있다.

따라서 최근에는 기존의 자기재를 대체하여 Silicone, EPDM, EVA, Epoxy 수지 등과 같은 고분자 재질의 애자가 활발하게 개발·적용되고 있고 고분자 애자의 응용은 관련기술의 비약적 발달과 함께 미국, 유럽 등을 중심으로 실용화되어

급속한 질적, 양적 확대를 나타내고 있다. 고분자 애자는 고강도화, 고기능화를 통하여 차세대 송배전용 절연지지물로서 그 위치를 공고히 함과 동시에 전철용, 초고압용 애관 등의 분야로 그 실용화 범위를 확대하고 있는 추세이다. 한편 WTO 체제 출범이후 이미 현장 적용경험을 확보한 해외 선진업체들이 아시아에서 일본 다음으로 크게 성장한 국내 초고압 절연물 시장으로의 적극적 진출을 구체적으로 모색하고 있는 시점이다.

본 고에서는 송배전 절연물 분야의 세계적 추세인 고분자 애자의 기술개발 동향과 특징을 소개하고 해외 선진업체들의 국내시장 침투에 적극적으로 대처하기 위한 국산 개발된 고분자 애자의 활용방안에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 고분자 애자의 개발역사

1950년대 말 가공 송전선로용으로 기존에 사용되던 자기재 애자료를 대체하기 위하여 가볍고, 전기적, 기계적 특성이 개선된 신소재 애자의 개발을 계획하기 시작하였다. 최초의 옥외용 고분자 애자는 1959년 미국에서 개발된 에폭시 재질의

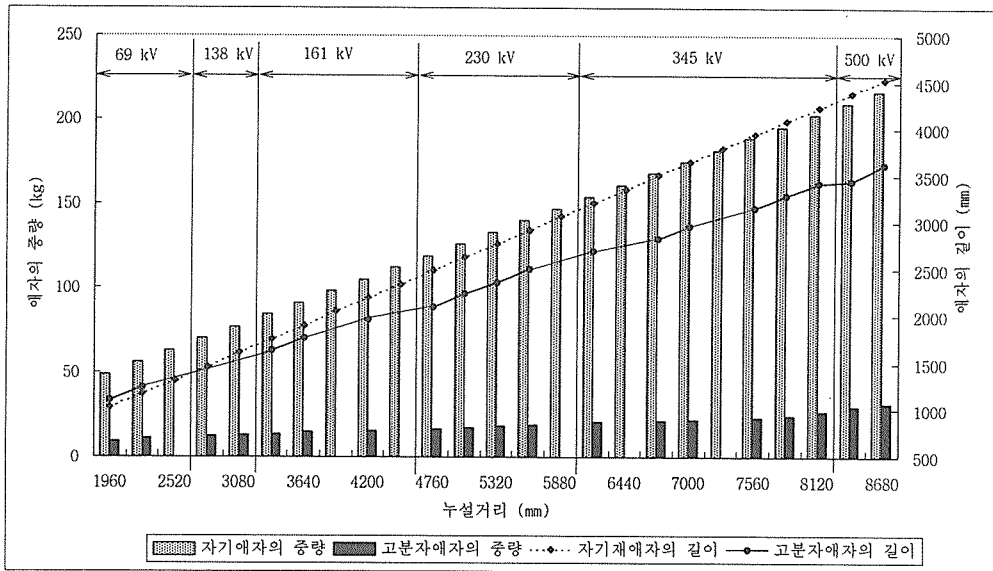
애자였으나 에폭시 갓부에서의 심각한 트래킹과 침식현상으로 인해 상용화로 성공하지는 못하였다. 몇 년후 유럽에서 FRP Rod위에 유기합성물 재질의 외피부를 덮어 씌운 제 1세대 고분자 애자가 개발되었다. 그 당시 제조사들은 다양한 외피 재질을 이용하였으며 요구되는 특성을 얻기 위해 유기물에 SiO<sub>2</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>, ZnO 등의 무기물 필러를 충전하여 제조하기 시작하였다. 금구부는 다양한 방법으로 접속하였는데 에폭시 수지로 접착시키는 방법, Rod에 썸기형 금구를 박아넣는 방법, Rod에 금구를 직접 압착하는 방법 등이 사용되었다. 이들 초기 고분자 애자는 15년 이상 일부 선로에서 시험적으로 사용되었지만 초기의 경험은 매우 실망스러웠다. 포설후 수년안에 트래킹 (Tracking), 침식 (Erosion), 초킹 (Chalking), 크레이징 (Crazing)등 외피재의 열화현상이 나타났으며, 심재와 외피재 사이 계면부위의 기밀성이

저하되어 수분침투를 야기하고, 금구가 분리되어 정전사고를 이끌기도 하였다.

계속된 실패 경험을 통해 많은 애자 제조사들이 고분자 애자의 생산을 포기하기도 하였지만, 일부 회사들은 고분자 재료의 처방기술, 접속기술 등 문제점들을 점차 개선시켜 오늘날의 고분자 애자의 모습을 갖추게 되었다.

### 3. 고분자 애자의 특성

고분자 애자의 일반적인 특징으로는 기존의 자기재 애자에 비해 월등한 발수성에서 기인하는 우수한 내오손 특성 및 내트래킹성을 들 수 있다. 또한 외피재가 고무재질로서 기계적 충격에 의해 잘 깨어지지 않기 때문에 사고 또는 외부의 물리적 요인에 의한 애자파손의 위험이 적다는 장점이 있다. 그 무게에 있어서도 자기재 애자에 비해



(그림 1) 자기재애자와 고분자애자의 중량, 길이비교

1/3 ~ 1/10 정도로 경량화가 가능하며 성형성이 좋기 때문에 같은 절연길이에서도 많은 누설거리를 확보할 수 있으므로 그 길이에 있어서도 소형화가 가능하다고 할 수 있다.

(그림 1)은 송전용으로서 각 전압 등급별, 오손 등급별로 기존에 사용되고 있는 자기재 애자련과 이와 등가적으로 사용할 수 있는 미국 L사 고분자 애자를 누설거리에 대한 중량과 길이로 비교한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 고분자 애자가 중량에 있어서는 월등히 경량이며, 애자의 길이에 있어서도 전압등급이 높아질수록 고분자 애자가 훨씬 소형화되고 있음을 알 수 있다. 고분자 애자는 이처럼 소형, 경량이면서도 고강도, 고인장력의 애자로 제조할 수 있기 때문에 주변설비의 소형화, 보관, 수송 및 설치인력, 보수 등의 면에서 현저한 성력화가 가능하다. <표 1>은 자기재 애자와 고분자 애자의 일반적 특성을 비교·정리한 것이다.

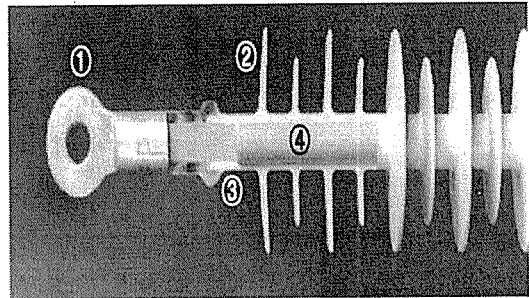
<표 1> 고분자애자와 자기재애자와의 일반적 특성 비교

특성 항목	자기재 애자	고분자 애자
Vandalism	×	◎
내Tracking 특성	○	○
표면 발수성	×	◎
내오손성	×	◎
자기세정성	△	◎
내후성 (자외선, 산화)	◎	○
전기적 회복특성	○	◎
기계적 특성	○	○
유지보수 비용	×	◎
중량	×	◎

◎: Very Good ○: Good △: Normal ×: Bad

#### 4. 고분자 애자의 구성

고분자 애자는 내부절연과 기계적 응력을 감당하는 FRP Rod, 또 Rod를 보호하고 외부 절연누설거리를 확보하는 기능을 가진 외피부의 최소 2부분으로 이루어진 절연부의 양단에 연결용 금구를 접속한 형태의 애자이다. 일반적인 고분자 애자의 구성요소 및 기본요건은 (그림 2)와 같다.



- ① 취부금구                      ② 외피절연부
- ③ 계면처리부                  ④ FRP 심재

(그림 2) 고분자 애자의 구성요소

##### 4.1 외피 절연부

외피 절연부를 설계하는 데 있어서는 우선 오손 섬락전압에 영향을 주는 요소들에 대해 검토할 필요가 있다. 즉, 애자의 표면이 어느 정도의 발수성을 유지하고 있는지에 대한 표면 도전도, 사용환경에 따른 등가염분 부착밀도 (Equivalent Salt Deposit Density, ESDD), 애자의 길이, 애자의 누설거리 및 애자의 직경과 갓의 형상 등이 고려되어야 한다. 또한 절연부 형상 성형시의 작업성은 애자의 단가를 결정하는 중요한 요소가 되므로 절

연부 성형을 위한 사출용 금형 설계시 사출 simulation 등의 해석 기법을 통해 최적의 작업성을 설정하는 방법이 이용된다.

고분자 애자의 외피재로서 사용되고 있는 Base 재료로는 Epoxy, EPDM (EPR), EVA 그리고 Silicone 등이 사용된다. 각 재료별 특징은 <표 2> 와 같다.

한편, 이들 재질에 옥외용 전기절연용 외피재료로서의 요구되는 특성들을 감안하여 여러가지 기

능성 물질들이 첨가된다. 즉, 내자외선성을 향상하기 위하여 안료와 자외선 흡수제가 첨가되며 내오존성과 내열성을 향상시키기 위해서 산화 방지제를 사용하고 일부에서는 발수성을 강화하기 위한 방법으로 저분자량의 monomer를 소량 첨가하기도 한다. 또한 내트래킹성과 내아크성을 향상시키기 위해서는 Al(OH)<sub>3</sub>과 같은 금속수화물이 첨가된다.

<표 2> 외피재료별 비교

외피재	특 징	제 조 방 식	비 고
Epoxy	- 기계적 강도 우수하나 저온 크랙성 결점 - 내트래킹성이 열세 - 상대적으로 중량	- Casting	- 유럽등지에서 arrester 및 배전급 애자에 일부 적용
EPDM (EPR)	- 기계적 강도, 성형성 우수 - 발수성과 내후성, 내트래킹성 상대적 열세	- 사출 (Injection Molding) - Press Modular - 이송성형 (Transfer Molding)	- 현재 미주에서 일부 적용되고 있으며 주로 배전급, 경오손 지구용 애자로 사용
EVA	- 전기적, 기계적, 내후성 양호 - 장기 사용시 발수성 저하가 현저함	- 열수축 방식	- 단일회사에서 Skirt 독점 공급 - 특허로 인해 기술접근 곤란
Silicone	- 우수한 발수성, 내후성, 내트래킹성 - 찢어짐 특성 다소 열세 - 상대적 고가	- 사출 (Injection Molding) - Press Modular - 이송성형 (Transfer Molding) - 액상사출(액상실리콘의 경우)	- 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 외피재료 - 대부분의 송전급 애자에서 적용되고 있는 재질

## 4.2 심재

고분자 애자의 내부심재로 사용되는 FRP (Fiber Glass Reinforced Plastics)는 열경화성 수지를 유리섬유와 같은 강화재로 보강한 복합재료를 통칭하는 것이며 Base Matrix로는 에폭시계 또는 불포화 폴리에스터계의 재질이 주로 사용된다. 이때 Base Matrix와 유리섬유 혹은 무기물 첨가재들과의 계면결합성은 수분 흡습성과 관련이 되므로 애자의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표가 된다.

## 4.3 취부금구

일반적으로 고분자 애자용 금구재질은 그 접속 방법에 따라 다르게 적용된다. 압착식에 사용되는 재질로는 압연강, 기계구조용 탄소강, 알루미늄 합금 등이 있으며 단조용 재질은 기계 구조용 탄소강이 사용된다. 테이퍼 접착방식의 경우 구상화 흑연주철, 가단주철 등의 재질이 이용되는데 이는 접착제를 충전하여 강도특성을 만족시키기 위해 금구의 부피가 커지고 금구내부에 Slop를 주는 등 구조가 복잡하여 주물로 제작한다. 금구의 형상 및 접속구조의 설계시 애자의 포설환경을 감안해야 하며 이를 위해 응력해석 등의 해석기법을 이용하기도 한다. 또한 금구는 수분과 오염에 의한 부식을 방지하기 위하여 금구 표면에 용융 아연도금을 한다. 한편, 금구의 끝단부위는 애자의 전계분포에 영향을 주기 때문에 형상설계시 주의해야 하며 전계해석기법과 전파장해시험을 통해 코로나 현상을 최소화하는 노력이 필요하다.

금구의 접속방법은 압착법, 테이퍼 접착법, 썬기법 등이 이용되며, 압착법의 경우 공정이 간단

하고 고인장력의 접속에 적합하여 송배전선로용에 많이 사용되는 방법이고, 진동이 많은 포설환경에 사용되는 전철선로용 애자의 경우 테이퍼 접착법이 주로 적용된다.

## 4.4 계면부

고분자 애자에서의 기밀특성은 장기신뢰성 측면에서 특히 고려해야할 사항이다. 고분자 애자에는 앞서 설명한 FRP 심재내의 Base Matrix와 유리섬유, 충전제등의 미시적 계면 이외에도 금구부와 외피절연부, 그리고 심재와 외피절연부 사이의 거시적인 계면이 발생하게 된다. 후자의 경우에는 심재에 외피절연부를 도포하기전에 두 이종물질간의 화학적 결합을 위하여 Primer 처리를 함으로써 기밀구조를 확보하는 것이 보편적으로 이용되며, 전자의 계면에 대해서는 상온경화 Sealant를 도포하는 방법, 금구 내부에 실링재를 충전하는 방법, 그리고 외피절연부의 연장을 금구부 끝단부 위까지 몰딩하는 방법 등이 널리 사용된다.

## 5. 고분자 애자의 평가방법

고분자 애자는 자기재 애자에 비해 현장 적용경험이 적기 때문에 장기 신뢰성 측면에서 많은 논란이 되고 있다. 특히 외피절연부 재질이 유기합성체이기 때문에 옥외환경 하에서의 여러가지 열화요인 (자외선, 온도변화, 대기오염, 염분 등)에 장기 노출될 경우에 나타나는 현상들에 대하여 우선 검증하지 않으면 안된다. 오손상황에서의 외피재료의 성능은 일반적으로 발수성 및 내트래킹 특성을 통하여 평가하는데 ASTM, IEC 등에서 규정에 의해 평가방법으로 시험하는 것이 일반적이다.

제품에 대한 평가방법들은 전세계 우수기관에서 연구되고 있으며 80년대 중반이후 IEC, IEEE, ANSI, CEA 등에 고분자 애자에 대한 시험 및 적용규격을 제정하였고, 이에 대한 지속적인 개정작업이 진행되고 있다. 국내에서도 국내 포설환경에 적합한 평가규정 제정에 필요성을 인식하여 평가기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 가속열화시험에 있어서 고분자 애자의 내오손특성을 평가하는 방법으로 널리 알려져 있는 IEC 1109법에 의한 염무시험법이나 CEA LWIWG-01에서 규정된 내트래킹성 시험법은 그 운영이나 시험조건에 대한 근거 등이 명확한 기준에 의해 정립되지 않아 재현성 및 평가기준등에 많은 문제점들을 갖고 있으므로 국내 실정에 맞는 평가기준정립이 필연적이고 이에 따른 연구활동이 진행되고 있다.

## 6. 국내외 개발동향

### 6.1 해외 개발동향

전세계적으로 연간 약 16억불 규모의 초고압 절연물 시장에서 고분자 애자의 적용 비중은 대략 10~20% 수준에 불과하지만 많은 나라에서 고분자 애자의 우수한 특성 및 경제성에 대하여 인식하기 시작하면서 자기재애자에 대한 대체 비중이 급속도로 높아지고 있는 추세이다.

고분자 애자를 가장 많이 사용하고 있는 지역은 북미지역으로서 미국의 경우, 전체 애자의 약 30% 이상을 고분자 애자로 대체 사용하고 있으며, 캐나다에서는 1974년부터 송배전급에 고분자 애자를 사용하기 시작하여 현재 750kV급 까지 사

용하고 있다. 유럽의 경우 영국, 프랑스, 이태리, 스페인 등지에서 66kV, 132kV, 225kV 급 송전선로에 적용하여 사용되고 있고 헝가리에서는 1970년대 중반부터 주로 120kV급에 고분자 애자를 사용하기 시작하였다. 아시아에서도 일본의 우수 애자 제조업체에서 이미 고분자 애자를 세계적 수준으로 개발완료 하였으며, 특히 세계적인 자기재 애자 업체인 NGK사에서도 765kV급까지의 고분자 애자를 개발하였고 500kV 송전라인까지는 이미 실선로에 적용하고 있는 상황이다. 중국에서는 고분자 애자의 개발을 적극적으로 추진하여 이미 자체 제조기술을 갖추고 있으며, 1992년 이래로 주로 132kV 송전라인에 고분자 애자를 적용하기 시작하여 적극적으로 고분자애자로 대체해 가고 있는 상황이다.

이밖에도 호주와 남미, 남아프리카, 중동 등지에서도 고분자 애자를 사용하고 있는 것으로 알려져 있다.

### 6.2 국내 개발동향

본 절에서는 LG전선의 고분자애자 개발 이력을 중심으로 국내 개발동향을 소개하고자 한다.

국내 고분자 애자는 '90년대 초부터 개발되기 시작하였으며, 전력회사, 제조회사, 학계, 연구기관이 서로 연계하여 개발과제를 수행해 나아갔다. 초기의 개발과제는 전철용 고분자 장간애자, 배전용 고분자애자 등 배전급을 중심으로 수행되었으며 다양한 외피재료를 통한 제조공정기술의 연구들이 시도되었다.

외피재료별로 시도된 개발이력을 살펴보면 Silicone, Epoxy수지, EPDM, 변성 EVA등을 이용한 배전급 고분자 애자들이 개발되었으며, 개

발된 애자를 평가하기 위한 여건을 만들기 위한 많은 노력이 있었다. 이와 더불어 한전에서 고분자애자에 대한 필요성을 인식하고 1995년말 배전선로용 고분자 애자의 구매시방을 공개하여 국내 관련업체의 개발의지를 고무시켰다. 사업성 관점에서 배전선로용 고분자 애자는 상대적으로 부가가치가 낮은 대신 수요가 많아 낮은 단가의 품질을 만족하는 제품의 공급이 관건이 되므로 애자의 설계, 제조기술에 있어서 최적화가 필수적이다. 따라서 사용되는 외피재료도 성능은 여타 재료에 비해 우수하지만 값이 비싼 Silicone 대신 상대적으로 저렴하면서도 배전선로에서 요구하는 전기적, 기계적 특성을 만족하는 EPDM 재질이 주종을 이루고 한전 구매 사양에서도 채택되어 있다.

전철선로 가동 브래킷부의 절연을 위해 적용되는 장간애자의 경우 도심구간의 매연에 대한 오손 특성을 감안하여 내트래킹성과 발수성이 탁월한 실리콘을 외피재료로 사용하고 금구부의 접속방식은 전철선로에서의 환경을 고려하여 진동특성에 강한 테이퍼 접착방식으로 개발되었다. 95년 개발이 완료된 이후 실선로 시험구간에서의 실증시험 등 꾸준한 사업화 준비를 통해 98년부터 상용 전철선로 구간에 국산 고분자애자가 적용되고 있다.

송전급 고분자 애자의 경우, 비록 외국 제품이기는 하지만 국내 최초로 송전급 고분자 애자가 도입되어 현재 시사용을 위한 설치단계에 있다. 국내 송전급 고분자 애자의 개발은 96년부터 154kV급 고분자 애자 개발 과제가 시작되어 장조장의 고인장 특성을 갖는 고분자 애자의 제조기술 개발과 초고압 선로용 고분자 애자의 평가기술정립을 목표로 수행되었다. 외피재료로는 역시 내오손성 및 내후성이 우수한 실리콘 재질이 사용되었으며, 장조장 애자를 사출방식으로 성형하는 제조

기술을 개발하였고, 각종 인공열화시험을 통해 개발된 고분자 애자의 신뢰성을 확인하였다. 또한 전북 고창 해안가의 염해지구에 애자 시험장을 건설하여 실선로에서의 적용타당성 및 신뢰성 검증은 물론 고분자 애자에 영향을 미치는 여러 환경적 요인들에 대한 연구도 함께 진행함으로써 우리나라 기후 및 환경에 적합한 고분자애자의 개발에 총력을 다하고 있다. 개발과제는 현재 마무리 단계로서 최초의 국내산 송전용 고분자 애자의 상용선로 적용은 99년 말을 목표로 추진중에 있다.

## 7. 개발기술의 활용방안과 향후과제

고분자 애자는 이미 20여년 전부터 선진외국에서 널리 사용되고 있고 초기의 우려와는 다르게 실선로 적용경험이 있는 세계 유수의 전력회사들의 입을 통해 고분자 애자의 장점과 안정성이 널리 알려지고 있는 상황이다. 이미 선진 외국업체들은 그들의 개발품을 전략적으로 자국의 전력시스템에 적용하여 실선로에서의 장기적 성능을 확인하고 있으며 이러한 확보된 신뢰성을 바탕으로 세계 시장을 독점하려 하고 있다. 우리나라에서도 이미 전철용, 배전선로용 고분자 애자에 이어 최근에는 송전급에서도 해외업체의 침투를 경험한 바 있다. 그러나 현재 우리의 상황은 과거 자기애자의 경우와 같이 일방적으로 외국 선진업체에 종속되어야할 입장과는 상당히 다르다. 이미 우리나라에서도 수요자, 제조자, 학계 및 연구기관이 연계하여 고분자 애자에 대한 연구가 10년 가까이 진행되고 있으며, 이제 초고압용 고분자 애자에 대한 설계, 제조기술 뿐만 아니라 평가기술에 대해서도 세계수준에 근접한 단계에 이르렀다고 할 수 있다.

이제는 그동안의 산-학-연의 연구개발 노력에 대한 실질적인 결실인, 우리의 제품이 국내선로에 활발하게 적용되어 국내 전력산업발전에 근간이 되고 나아가 외국선진업체의 제품과 세계시장에서 당당하게 겨룰 수 있는 기반을 조성하기 위한 막바지 노력에 전력을 다해야할 시점이다.

해외의 고분자 애자 적용 선례로 볼 때, 대부분의 우수 애자 업체들은 꾸준한 시행착오를 통한 기술개발과 더불어 자국 전력회사의 적극적인 지원을 통해 성장하였다. 따라서 우리나라도 애자 산업이 자리를 잡기 위해서는 최대 수요자인 한전의 국산 개발제품에 대한 적극적인 수용의지가 절실히 요구되며 이는 후발 국내 개발업체가 해외업체들의 국내시장 침투에 대해 당당하게 맞서 겨룰 수 있는 근간이 될 수 있다. 또한, 국내 포설환경에서의 고분자 애자에 대한 실선로 평가 방법과 수명에 대한 판단기준을 마련하기 위하여 개발된 제품을 적극적으로 시범적용함으로써 축적된 국내 기술을 적극 활용하고 진보시켜야 한다.

고분자 애자의 일반적인 열화 메카니즘과 그에 대한 가속열화평가 방법은 이미 대부분 규명되고 제안되어 있으나 이러한 가속열화조건과 국내 포설환경과의 상관관계는 앞으로도 꾸준한 노력을 기울여야만 규명될 수 있다. 60 여 년 이상의 현장 경험에도 아직까지 사고가 발생하고 이에 대한 연구가 진행되고 있는 자기재 애자의 경우와 마찬가지로 고분자 애자에 있어서도 국내 환경에 보다

적합한 제품개발과 평가방법 개선의 노력은 전력회사와 국내 제조업체 공동의 몫이며 꾸준히 풀어나가야할 과제인 것이다.

## 8. 결 론

가공선로용 절연물에 있어서 기존 자기재 애자에 비해 많은 장점을 가지고 있는 고분자 애자로의 시장전환은 세계적인 추세이고 필연적이라 할 수 있다. 본 고에서는 이러한 추세와 개발 필요성에 대한 인식을 같이하고자 고분자 애자의 소개와 국내외 개발동향, 그리고 활용방안을 제시하였다.

이와 같은 고분자 애자개발과 적용경험을 통해 축적된 기술은 초고압 절연기술에 대한 독자적인 기술력을 확보하고 아울러 고분자 애자가 우리나라 전력계통의 근간이 되고 가공 송전선로의 모든 자기재 애자를 대체하여 “한국시장은 일본 한 제조업체의 완전한 종속”이라는 국가적 수치에서 벗어날 수 있는 초석이 될 것이며 더 나아가 우리의 제품과 기술이 해외 시장에도 적극 진출할 수 있는 기회를 조기에 제공하는 계기가 되고 피부로 다가오는 무한경쟁체제에서 선진 외국 기술의 국내진출에 대하여 독자적인 기술력 확보가 가능하게 되어 국내 관련 산업발전에 크게 기여하리라 믿는다.