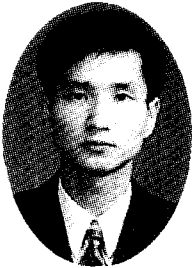


송배전용 Composite Insulator의 개발동향 및 특성



한동희
한국전기연구소
전기재료연구부 선임연구원



황석중



박완기
LG전선(주)
전력연구소 부소장



이철호
평일산업(주)
기술연구소 재료부장

1. Composite Insulator의 개발 배경

국민소득수준의 향상과 산업의 발달로 전기에너지를 이용한 국민 편익시설과 산업설비가 늘어남에 따라 송전전압의 승압이 불가피하고 절연물의 사용환경이 산업의 발달과 더불어 더욱 열악해짐으로서 신뢰성 있는 초고압 절연물의 개발이 요구되고 있다.

국내 가공 송배전선로에 사용되고 있는 자기재 애자(porcelain)는 전기절연성과 내후성이 우수한 장점을 지니고 있으나 무거운 중량으로 인한 운반, 설치의 어려움과 인장강도 및 물리적 충격에 약한 단점을 지니고 있다. 또한 표면에너지가 커서 친수특성을 나타내므로 물이 기여된 상황에서의 오손특성이 좋지 않다. 따라서 최근에는 기존의 자기재를 대체하는 실리콘 고무, EVA, EPDM, 에폭시 수지 등과 같은

고분자 재료로 된 애자가 개발되거나 실선로에 사용되고 있다.

송배전선로에서 composite insulator(CI)의 응용은 관련기술의 비약적 발달과 함께 미국, 유럽 등을 중심으로 실용화되어 급속한 질적, 양적 확대를 나타내고 있다. CI는 고강도화, 고기능화를 통하여 차세대 송배전용 절연지시물로서 그 위치를 공고히 함과 동시에 전철용, 초고압용 애관 등의 분야로 그 실용화 범위가 확대되고 있는 추세이다. 한편 WTO 체제 출범이후 이미 현장 적용경험을 확보한 해외 선진업체들이 아시아에서 일본 다음으로 크게 성장한 국내 초고압 절연물 시장의 적극적 진출을 구체적으로 모색하고 있는 시점이다.

국내의 경우 전철용 및 배전용 CI와 같은 저압급 애자의 개발이 완료되어 실선로에 적용을 준비하고 있으나 초고장력 및 고신뢰성이 요구되는 초고압용 애자분야에 대한 연구는 미약하고 특히 신소재 애자의 평가기술 분야에 있어서는 국내 많은 기관에서 연구되고 있으나 아직까지 국내실정에 맞는 평가기술을 정립하지 못한 실정이다.

따라서 현재 송배전 절연물의 세계적 추세인 CI에 있어서 초고압 절연에 대한 기반기술을 보유하고 있는 역량 있는 대학, 연구소, 애자 제조업체 등에 의한 설계기술, 제조기술, 시험기술의 국

내 조기정착과 국내 포설환경에 적합한 고분자애자의 열화특성 평가기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

2. 국내외 개발동향

2.1 고분자 애자의 개발역사

1950년대 말 기준에 사용되던 자기재 애자를 대체하기 위하여 가볍고, 전기적, 기계적 특성이 우수한 신소재 애자의 개발을 계획하기 시작하였다. 최초의 옥외용 고분자 애자는 1959년 미국 GE사에서 개발된 에폭시 재질의 애자였으나 에폭시 갯부에서의 심각한 트래킹과 침식현상으로 인하여 상용화는 실패하였다. 몇 년후 유럽에서 FRP 봉위에 유기재질의 외피를 덮어씌운 제 1세대 고분자 애자(CI)가 개발되었다. 그 당시 제조사들은 다양한 외피재질을 사용하였으며 요구되는 특성을 얻기 위해 유기물에 SiO₂, Al(OH)₃, ZnO 등의 무기필러를 충전하여 제조하기 시작하

였다. 특히 Al(OH)₃가 내트래킹성에 효과적인 무기필러라는 사실이 밝혀지면서 고분자 재료에 대한 연구가 가속화되었다. 금구부는 다양한 방법으로 접속하였는데 에폭시 수지로 접착시키는 방법, FRP 봉에 썬기형 금구를 박아 넣는 방법, FRP 봉에 금구를 직접 압착하는 방법 등이 사용되었다. 이들 초기 고분자 애자는 15년 이상 일부선로에서 시험적으로 사용되었지만 초기의 경험은 매우 실망스러웠다. 포설 후 수년 안에 트래킹(tracking), 침식(erosion), 초킹(chalking), 크레이징(crazing) 등 외피재의 열화현상이 나타났으며, 심재와 외피재의 계면 접착성의 저하로 기밀성이 떨어져 수분침투를 야기하고, 금구가 분리되어 정전사고를 이끌기도 하였다.

계속된 실패 경험을 통해 많은 애자 제조사들이 고분자 애자의 생산을 포기하기도 하였지만, 일부 회사들은 고분자 재료의 처방 기술, 접속기술 등 많은 문제점

들을 점차 개선시켜 오늘날의 CI를 탄생하게 하였다.

2.2 해외 개발동향

전세계적으로 연간 5억불 규모의 초고압 절연물 시장에서 CI의 적용 비중은 약 5% 수준에 불과하지만 많은 나라에서 CI의 우수한 특성 및 경제성에 대하여 인식하기 시작하면서 자기재애자에 대한 대체 비중이 급속도로 높아지고 있는 추세이다.

CI를 가장 많이 사용하고 있는 지역은 북미지역으로서 미국의 경우, 전체 애자의 약 30% 이상을 CI로 대체 사용하고 있으며, 캐나다에서는 1974년부터 송배전급에 CI를 사용하기 시작하여 현재 735 kV급까지 사용하고 있다. 유럽의 경우 영국, 프랑스, 이태리, 스페인 등지에서 66 kV, 132 kV, 225 kV급 송전선로에 사용되고 있고 헝가리에서는 1970년대 중반부터 주로 120 kV급에 CI를 사용하기 시작하였다. 아시아에서도 일본의 우수 애자 제조

표 1. Composite insulators의 적용예

사용전압 (kV)	설치장소	오염수준	손상기간	결과
420	ESCOM(남아프리카)	-	즉시	Glass fiber bundle 제조 불량으로 인한 FRP의 파열
	RWE(독일)	-	4년	끝단부의 불량으로 인한 2개 애자의 FRP 파열
	BEWEG(독일)	-	6년	금속재와 shed사이의 끝부분에서 brittle fracture
	독일과 다른 지역	-	즉시	큰 새에 의해 발생한 약 180개 애자의 shed 손상
±400 (D.C)	LAWP(미국)	심각	2년	2개 애자의 local line-shaped 부식
	BPA(미국)	보통	1년	Shed를 가로 지른 fine 균열
123~420	FGH(독일) Ontario-hydro(캐나다)	높은 오염 과 습기	1~6년	FRP의 hydrolysis로 인한 경계면의 부분적인 관통
123~300	CERL, RWE(독일)	심각	1~2년	3개 애자의 local line-shaped 부식
123~300	CERL, RWE(독일) ESCOM(남아프리카)	심각	1~2년	FRP 봉 위로 shed 부위의 부식
245	FGH(독일)	심각	5년	약간의 shed가 작고 둥근 cavities를 보임
230	Brington 애자 시험장 (영국)	심각한 해변오염	4년	shed에 부식
132		-	2.5년	약간의 부식

업체에서 이미 CI를 세계적 수준으로 개발완료 하였으며, 특히 세계적인 자기재 애자 업체인 NGK사에서 765 kV급까지의 CI를 개발하였고 500 kV 송전라인까지는 이미 북미나 동남아시아의 실선로에 적용하고 있는 상황이다. 중국에서는 CI의 개발을 적극적으로 추진하여 이미 자체 제조기술을 갖추고 있으며, 1992년 이래로 주로 132 kV 송전라인에 CI를 적용하기 시작하여 적극적으로 CI로 대체해 가고 있는 상황이다. 이밖에도 호주와 남미, 남아프리카, 중동 등지에서도 CI를 사용하고 있는 것으로 알려져 있다. 표 1은 CI의 적용예를 나타낸 것이다.

2.3 국내 개발동향

국내 CI는 90년대 초에 LG전선, 제룡산업, 평일산업, 한국전기연구소 등이 주축이 되어 본격적으로 개발되기 시작하였고 대한전선, 보성중전기, 극동전선, 태양종합고무, 화승화학 등 다수기업이 관심을 갖고 있거나 개발중에 있다. 국내 CI개발은 주로 배전급을 중심으로 전개되었으며 다양한 외피재료를 통한 제조공정기술의 연구 등이 시도되었다. 외피재료별로 시도된 개발을 살펴보면 실리콘고무, EPDM, 변성EVA 등을 이용한 배전급 CI들이 개발되었으며, 개발된 애자를 평가하기 위한 여건을 만들기 위한 많은 노력이 있었다. 이와 더불어 한전에서도 CI에 대한 필요성을 인식하고 1995년 말 배전선로용 고분자애자의 구매시방을 공개하여 국내 관련업체의 개발의지를 고무시켰으며 송전급의 경우에도 98년 국내 최초의 외자 도입을 검토하고 있으며 이를 위해 구매시방서를 제정한 단계에 이르고 있다.

LG전선은 95년초 한전지원과제로서 전철용 고분자 애자 개발과제를 완료하여 1996년 국산신기술 인증(KT)을 획득하였고, 1998년 철도청에 납품을 계약하였다. 배전용 CI의 경우 재질에

공동으로 한전지원과제로서 송배전용 실리콘 고무 CI 개발과제를 수행하여 1997년 개발 완료하였으며 현재 실선로에 설치를 위한 준비작업을 진행 중에 있다. 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라

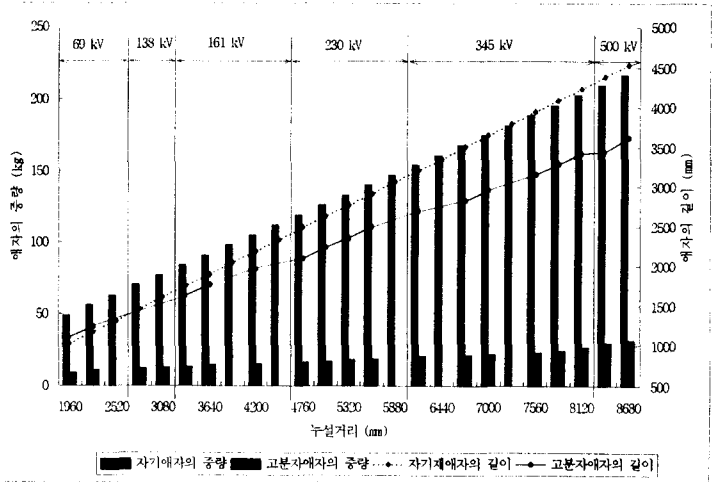


그림 1. 자기재 애자와 고분자 애자의 중량, 길이 비교

따라 EPDM을 이용한 사출방식과 변성EVA를 이용한 열수축방식의 두 가지 애자를 개발하였다. 또한 96년부터 한전지원과제로서 '송전용 애자의 제조기술 및 열화시험기술 개발'이라는 과제를 시작하여 초고압, 고인장력, 장조장 애자의 제조기술 뿐만 아니라 열화시험기술 개발도 함께 진행하고 있으며 현재는 154 kV급 실리콘 애자를 시제조하여 각종 신뢰성 평가를 진행 중에 있다. 또한 한국전력공사와 공동으로 전북 고창의 해안지구애자 시험장을 건설하여 장기 신뢰성 평가는 물론 CI에 영향을 미치는 여러 환경적 요인들에 대한 연구도 함께 진행함으로써 우리나라 기후 및 환경에 맞는 애자 및 평가기술을 정립할 계획이며 99년까지 345 kV급 CI의 개발도 완료할 계획이다

제룡산업은 한국전기연구소와

의 오손환경을 고려하여 내오손 특성이 가장 우수한 실리콘고무를 선택하였으며 가격을 줄이기 위한 공정을 검토 중에 있다.

평일산업은 1992년 미국 Lapp사와 기술협약을 맺고 1993년 9월 고분자 애자 제조설비를 도입하였으며 1996년 12월 EPDM을 이용한 배전용 CI를 개발 완료하여 한국전력공사에 20,000개를 납품하였다.

3. Composite insulator의 장점

CI의 특징으로는 기존의 자기재 애자에 비해 월등한 발수성에서 기인하는 우수한 내오손 특성 및 내트래킹성 등을 들 수 있다.

표 2에 자기재 애자와 고분자 애자(CI)의 일반적 특성을 비교 정리하였다.

그림 1은 송전용으로서 각 전압 등급별, 오손등급별로 기존에

표 2. 자기재 애자와 CI의 특성 비교

특성 항목	자기 애자	CI
Vandalism	×	◎
내트래킹성	○	○
표면발수성	×	◎
내오손성	×	◎
자기세정성	△	◎
내후성	◎	○
전기적 회복성	○	◎
기계적 특성	○	○
유지보수비용	×	◎
중량	×	◎

◎ : very good, ○ : good,
△ : normal, × : bad

사용되고 있는 자기재 애자들과 이와 동가적으로 사용할 수 있는 미국 L사 고분자애자를 누설거리에 대한 중량과 길이로 비교한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 고분자 애자가 중량에 있어서는 월등히 경량이며, 애자의 길이에 있어서는 전압등급이 높아질수록 고분자애자가 훨씬 소형화되고 있음을 알 수 있다. 고분자 애자는 이처럼 소형, 경량이면서도 고강도, 고인장력의 애자로 제조할 수 있기 때문에 주변 설비의 소형화, 보관, 수송 및 설치인력, 보수 등의 면에서 현저한 성력화가 가능하다.

4. Composite Insulator의 구성

CI는 내부절연과 기계적 응력을 감당하는 FRP 봉, 봉을 보호하고 외부 절연누설거리를 확보하는 기능을 가진 외피부의 최소 2부분으로 이루어진 절연부의 양단에 연결용 금구를 접속한 형태의 애자이다. 일반적인 CI의 구성요소는 그림 2와 같다.

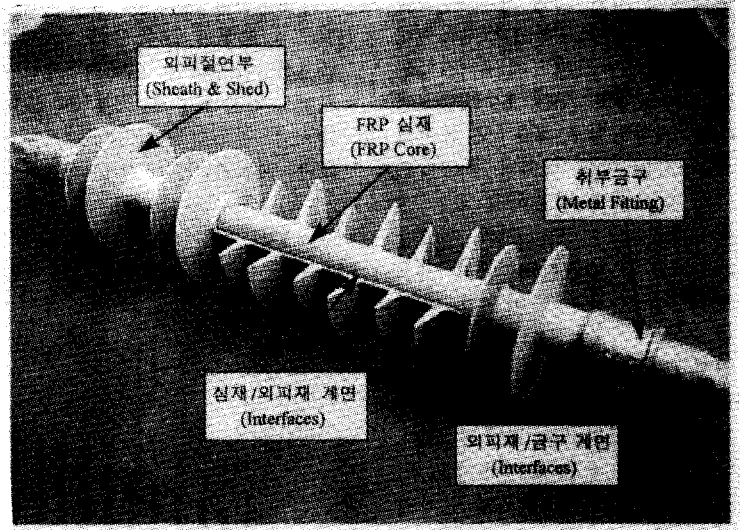


그림 2. Composite Insulator의 구성요소

4.1 외피 절연부

외피 절연부를 설계하는 데 있어서는 우선 오손점락전압에 영향을 주는 요소들에 대해 검토할 필요가 있다. 즉, 애자의 표면이 어느 정도의 발수성을 유지하고 있는지에 대한 표면 도전도, 사용환경에 따른 등가염분부착밀도 (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 절연부 성형을 위한 사출용 금형 설계 시 사출 simulation 등의 해석 기법을 통해 최적의 작업성을 설정하는 방법이 이용된다.

CI의 외피재로서 사용되고 있는 기지재료는 실리콘, EPDM (EPR), EVA 등이 사용되며 각 재료별 특징은 표 3과 같다. 한편, 이들 재질에 옥외용 전기절연용 외피재료로서의 요구되는 특성들을 감안하여 여러 가지 기

능성 물질들이 첨가된다.

4.2 심재(core)

CI의 내부심재로 사용되는 FRP(Fiber Glass Reinforced Plastics)는 열경화성 수지를 유리섬유와 같은 강화재로 보강한 복합재료를 통칭하는 것이며 매트릭스 수지로는 에폭시 및 불포화폴리에스테르가 주로 사용된다. 이때 매트릭스 수지와 유리섬유 혹은 무기물 첨가재들과의 계면결합성은 수분 흡습성과 관련이 되므로 애자의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표가 되며 요구되는 중요한 특성으로는 기계적 강도, 전기절연성 및 열적특성(열팽창계수) 등이 있다.

4.3 취부금구

일반적으로 CI용 금구재질은 그 접속방법에 따라 다르게 적용된다. 압착식에 사용되는 재질로는 압연강, 기계구조용 탄소강, 알루미늄 합금 등이 있으며 단조용으로는 기계 구조용 탄소강이

표 2. 외피재료별 비교

외피재	특 징	제 조 방 식	비 고
Silicone rubber	<ul style="list-style-type: none"> 우수한 발수성, 내트래킹성, 내후성 찢어짐 특성 다소 열세 상대적 고가 	<ul style="list-style-type: none"> Injection Molding Press Molding Transfer Molding Molding(액상실리콘) 	<ul style="list-style-type: none"> 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 외피재료 대부분의 송전급 애자에서 적용되고 있는 재질
EPDM (EPR)	<ul style="list-style-type: none"> 기계적 강도, 성형성 우수 발수성, 내후성, 내트래킹성 상대적 열세 	<ul style="list-style-type: none"> Injection Molding Press Molding Transfer Molding 	<ul style="list-style-type: none"> 주로 배전급, 경오손 지구 용 애자로 사용
EVA	<ul style="list-style-type: none"> 전기적, 기계적, 내후성 양호 장기 사용시 발수성 저하 	<ul style="list-style-type: none"> 열수축 방식 	<ul style="list-style-type: none"> 단일회사가 skirt 녹점 공급 특히로 인해 기술접근 곤란

사용된다. 테이퍼 접착방식의 경우 구상화 흑연추철, 가단추철 등의 재질이 사용되는데 이는 접착제를 충전하여 강도특성을 만족시키기 위해 금구의 부피가 커지고 금구내부에 기공기를 주는 등 구조가 복잡하여 주물로 제작한다. 금구의 형상 및 접속구조의 설계시 애자의 포설환경을 감안해야 하며 이를 위해 용력해석 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 간단하고 고인장력의 접속에 적합하여 송배전선로용 CI에 많이 사용되는 방법이며, 진동이 많은 포설환경에 사용되는 전철선로용 CI의 경우 테이퍼 접착법이 주로 적용된다.

4.4 계면부

CI에서의 기밀특성은 장기 신뢰성 측면에서 특히 고려해야 할 사항이다. CI에는 앞서 설명한

FRP 심재내의 매트릭스 수지와 유리섬유, 충전제 등의 미시적 계면 이외에도 금구부와 외피절연부, 그리고 심재와 외피절연부 사이의 거시적인 계면이 발생하게 된다. 후자의 경우에는 심재에 외피절연부를 도포하기 전에 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 끝단부위까지 몰딩하는 방법 등이 널리 사용된다.

5. Composite insulator의 평가 방법

CI는 자기재 애자에 비해 현장 적용 경험이 적기 때문에 장기 신뢰성 측면에서 많은 논란이 되고 있다. 특히 외피절연부 재질이 유기합성체이기 때문에 옥외 환경 하에서의 여러 가지 열화 요인 (자외선, 온도변화, 대기오염, 염분 등)에 장기 노출될 경우 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 가속 열화시험에 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 명확하게 정립되지 않아 재현성 및 평가기준 등에 많은 문제점들을 갖고 있으므로 국내 실정에 맞는 평가기준 정립이 필연적이고 이에 따른 연구활동이 진행되고 있다.

6. 결 론

가공선로용 절연물에 있어서 기존 자기재 애자에 비해 많은 장점을 가지고 있는 CI로의 시장 전환은 세계적인 추세이고 필연

적이라 할 수 있다. 본 고에서는 이러한 추세와 개발 필요성에 대한 인식을 같이하고자 국내외 동향, CI의 구조 및 제조 관련기술, 신뢰성 평가기술 등에 대하여 국내에서 진행되고 있는 개발과제를 토대로 소개하였다.

이와 같은 고분자 애자개발을 통해 축적된 기술은 초고압 절연

기술에 대한 독자적인 기술력을 확보하고 아울러 CI가 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 시장에

도 적극 진출할 수 있는 기회를 조기에 제공하는 계기가 되고 피부로 다가오는 무한경쟁체제에서 선진 외국 기술의 국내진출에 대비하여 독자적인 자체 기술력 확보가 가능하게 되며 국내 관련 산업발전에 크게 기여하리라 믿는다.

< 강 동필 위원 >