

도시철도 직류 구간용 FRP 애자 개발 Development of FRP Insulators at DC Subway System



한택희(Taek Hee, Han) 정회원 | 서울메트로 기술연구소 시설연구부 전문위원 | 공학박사 | taekie@seoulmetro.co.kr
 심재석(Jae Suk, Sim) 정회원 | 서울메트로 기술연구소 시스템연구부 선임 | 공학사 | confi21c@seoulmetro.co.kr
 김윤식(Yoon Sik, Kim) 정회원 | 서울메트로 기술연구소 시스템연구부 과장 | 공학사 | kimchi@seoulmetro.co.kr
 강현일(Hyun Il, Kang) 정회원 | 서울메트로 기술연구소 시스템연구부 전문위원 | 공학박사 | kanghi@seoulmetro.co.kr
 이기승(Gi Seung, Lee) 정회원 | 서울메트로 기술연구소 시스템연구부 부장 | 공학석사 | lgisung@seoulmetro.co.kr
 조호령(Ho Ryung, Cho) 정회원 | (주)평일 기술연구소 부장 | 공학사 | hrcho@pyungil.com

1. 서론

최근 복합신소재의 성능 향상에 따라 산업 분야에서 복합신소재의 사용이 점차 증대되고 있으며, 새로운 분야에서의 복합신소재의 적용 외에도 기존에 사용되는 부재에서도 복합신소재를 적용한 제품의 개발이 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 복합신소재인 FRP(Fiber Reinforced Polymer)의 경우, 재료 자체의 고강도성, 내부식성, 경량성의 장점 이외에도 절연성이 우수하여 많은 전기장치에서의 절연재, 그리고 절연이 필요한 부재에도 그 적용성이 확대되고 있다. 현재, 국내에 포설된 교류(AC) 전기철도용 지상 전차선로에는 약 10년 전부터 국산화 개발된 폴리머 장간애자(FRP 장간애자)를 사용하고 있으며, 경부선 고속철도 2단계 전차선로에도 폴리머 장간애자와 지지애자가 채용되고 있다. 또한, 지하 구간에서는 급전선 지지용 폴리머애자(NSP-50)가 사용되고 있으며 터널구간에는 폴리머 장간애자와 폴리머 터널브래킷을 사용하고 있다. 일본의 경우에도 1990년 후반부터 직류(Direct Current, DC)구간 지상

및 지하선로에도 폴리머 장간애자와 지하구간 급전선용 폴리머 애자를 채용하여 사용하고 있다. 그러나 국내에서는 DC 지하구간용 전차선로인 T-bar 및 R-bar를 지지하는 지지애자와, DC 지상구간에 사용되는 장간애자는 아직도 수입품인 자기재(磁器材) 애자를 사용하고 있는 실정이며 AC구간 이상(different phase)용 및 AC/DC구간용 FRP 절연 구분 장치 모두 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이에, 서울메트로, 한국철도기술연구원, (주)평일에서는 한국건설교통기술 평가원의 지원으로, 전차선로에서 장기간 사용하여 신뢰성과 안정성이 입증된 폴리머애자 기술을 바탕으로, DC 구간용 자기재 지지애자와 장간애자 대체를 위한 FRP 애자를 개발하고, AC구간용 동상(same phase)용 애자 구분 장치 개발경험을 기본으로 하여 AC구간 및 AC/DC구간 이상용 FRP 절연구분 장치 개발을 수행하고 있으며, 이의 개발 과정과 개발품의 성능시험 결과를 소개하고자 한다.

2. 국내외 기술현황 및 전망

국내에서는 고분자 애자를 선호하는 세계적인 추세에 따라, 20년 전부터 한국전력을 중심으로 고분자 애자의 적용을 검토하였고, 일부 배전선로에 1990년대 초반부터 외국제품을 수입하여 시험 사용한 결과 우수한 특성을 나타내었으며, 1997년부터 국산 시제품을 시작으로 2000년도부터 본격적으로 확대 사용하기 시작하였다. 전차선로에 고분자 애자가 도입이 된 것은 1995년에 국내업체에서 고분자 장간애자의 개발이 완료되어 철도청 인정시험 및 공인기관 인증시험을 거쳤으며, 1997년 철도청 고분자 장간애자 구매시방이 제정되어 1998년 고분자 장간애자의 실용화가 가능하게 되었고 이후 터널 브래킷, 급전선용 지지애자, 현수용 T-S애자 등이 개발되어 코레일의 구매규격으로 제정되고 있는 상황이며, 최근에는 고속철도 가동 브래킷용 장간애자와 지지애자가 폴리머애자로 개발되었다.



그림 1. 자기재 애자와 FRP 애자

최근 AC구간 전차선로에는 약 10년 전부터 FRP 장간애자를 개발하여 사용하고 있으나, DC 1,500V 전차선로의 지지애자와 DC 1,500V 지상부 가동 브래킷에

사용되는 장간애자는 전량 수입제품을 사용하고 있는 실정이다. 또한, AC 25 kV 동상(same phase)용 절연구분 장치는 최근 FRP제 애자를 채용한 제품으로 국산화에 성공하여 2007년도부터 현장에 설치되어 사용 중이나, 교류 25,000V에 이상(different phase)용 구간의 전기적 구분을 위한 절연구분 장치와 교류 25,000V-직류 1,500V 연결구간의 전기적 구분을 하기 위한 절연구분 장치는 국내 기술이 없어 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 미국에서는 송배전 선로에만 전체 애자의 약 30%를 고분자 애자로 사용하고 있으며, 유럽에서도 영국, 프랑스, 이탈리아, 덴마크, 스위스, 노르웨이, 헝가리 등에서 송배전선로 뿐만 아니라, 전철용으로도 상당수 사용하고 있으며, AC 25 kV 전차선로의 장간애자, 지지애자 등을 폴리머애자로 사용하고 있다. 또한 아시아 지역에서도 일본을 비롯하여 중국에서도 많이 사용하고 있으며, 일본에서는 1985년에 전력중앙연구소에서 고분자 재료를 이용하여 전력기기로의 연구를 개시하였다. 또한 EVA재료를 사용한 고분자 애자의 개발에 따라 전력중앙연구소나 철도총합기술연구소에서 각종 고분자 재료를 사용한 고분자 애자의 옥외 과전폭로시험이 개시되었다. 이와 같이 폴리머 애자는 우수한 발수성과 내오손성 및 내트래킹 특성을 가지며, 연성과 강도를 확보하여, 자기재 애자 대비 약 1/3의 중량으로 공사비용의 절감이 가능하다. 또한, 실제 선로에 설치되어 장기수명이 입증되면서 폴리머 애자의 사용은 배전선로를 시작으로 송전선로용 애자 및 AC 전차선로, DC 전차선로용 애자까지 확대되고 있으며, 전 세계적으로 폴리머애자의 사용은 점점 증가하는 추세에 있다. 따라서 직류전기철도의 애자도 폴리머애자로 대체 사용이 확대될 것으로 판단된다.

3. FRP 애자 설계

3.1 자기재 애자 사용 현황

전차선로용 애자는 급전선, 전차선 등의 전선 및 곡선당김 금구 등의 부속설비를 전주 및 보, 완금 등에 지지 및 절연을 위하여 설치되어지며 이러한 애자는 전기적 인 절연성과 기계적인 강도를 요구하고 있다. 전차선로용 애자는 대기 중의 습도, 분진, 매연, 염해 등에 의하여 애자표면이 오손되어서 그 표면저항이 저하되어 누설전류가 증대에 따라 전기적 파괴를 발생시킬 우려가 있다. 이러한 애자의 파손은 지락, 단락사고 등으로 차량운행에 심각한 영향을 줄 수가 있기에 그 파급 영향이 크다. 자기는 취성재료로서, 자기재 지지 애자는 절연파괴 아크로 인하여 그림 2와 같은 파손이 발생하며, 이는 도시철도 전기 시설물 관리 효율을 저하시키는 요인이 되고 있다. 서울메트로 지상구간의 각 분소에 설치된 애자(표1, 그림 3)에 대한 점검을 수행하여, 애자의 상태를 A, B, C 등급으로 나누어 표 2와 같이 비율을 정리하였다. 표 2를 보면 전체 시설물에 설치된 애자에서 교체가 요구되는 C등급이 차지하는 비율이 47.3%로 거의 과반수에 미치고 있음을 알 수 있다. 특히 용도별로

리하였다.



그림 2. 아크로 인한 애자 파손 및 T-bar 손상

이는 도시철도 전기 시설물 관리 효율을 저하시키는 요인이 되고 있다. 서울메트로 지상구간의 각 분소에 설치된 애자(표1, 그림 3)에 대한 점검을 수행하여, 애자의 상태를 A, B, C 등급으로 나누어 표 2와 같이 비율을 정리하였다. 표 2를 보면 전체 시설물에 설치된 애자에서 교체가 요구되는 C등급이 차지하는 비율이 47.3%로 거의 과반수에 미치고 있음을 알 수 있다. 특히 용도별로

표 1. 시설물별 애자 수량

시설물별	수량	분소별					
		합정	구의	대림	군자	신정	신답
계	4,834	194	1,180	900	1,796	594	170
급전선 지지	2,268	72	828	516	714	78	60
급전분기	340	40	48	116	116	40	20
곡선당김금구 지지	884	36	94	394	394	202	42
조가선 지지	988	38	94	468	468	230	40
지 선	354	8	116	104	104	44	8

표 2. 애자 점검 결과

등급	항목	계	급전선 지지	급전분기	곡선당김 금구 지지	조가선 지지	지선
A등급		19.9%	22.8%	20.6%	13.5%	12.8%	35.9%
B등급		32.9%	13.6%	66.2%	55.2%	38.6%	52.8%
C등급		47.3%	63.6%	13.2%	31.3%	48.7%	11.3%

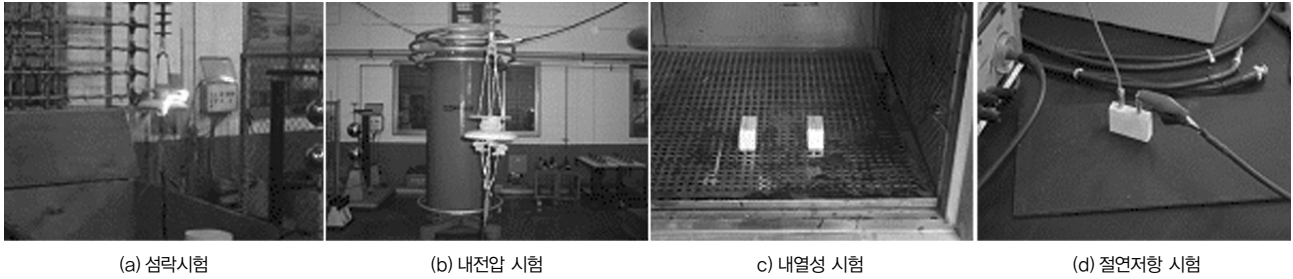


그림 3. 애자 성능 시험

보면 급전선 지지애자의 경우 약 63.6%로 부식상태가 심각한 상태이므로 조기 교체가 이뤄져야 할 것이다. 그 다음으로는 조가선 지지애자, 곡선당김금구 지지애자, 급전분기, 지선애자 순으로 전기적 용량이 크게 작용하는 개소일수록 부식이 많이 진행되고 있음이 조사되었다.

FRP는 연성 재료로서, 이와 같은 취성파괴를 방지할 수 있으며, 내부식성을 갖고 있다. FRP 애자의 설계 시에는 중량 감소에 따른 판타그래프 압상력, 판타그래프 습동에 의한 아크 발생시 발화, 오손 및 절연파괴 방지의 요건을 만족시켜야 하며, 기존 시설물과 호환성, 반영구적(20년 이상)인 수명 및 기존 수입품보다 30% 이상 저렴한 경제성을 만족하도록 설계에 고려하였다.

3.2 FRP 애자의 설계

3.2.1 장간애자의 설계

장간애자의 설계에 앞서 장간애자의 목표 성능을 설정하였으며, 이를 표 3에 나타내었다. 장간애자는 그림 5와 같이, FRP 코아, 하우징(housing), 고정금구로 구성된다. 폴리머 애자에 있어서 코아의 역할은 애자의 절연물과 설계 하중의 지지이다. 사용되는 수지는 가장 일반적이고 배전급 폴리머 애자용으로 널리 사용되는 polyester 수지, 중간 성능의 vinyl ester 수지, 기계적 특성, 내열성이 우수한 에폭시 수지가 있다. 본 연구의 애자 코아는 에폭시 수지를 고려하여 설계를 하였고 인장력에 영향을 미치는 유리섬유는 내부식성 E type 유

리섬유를 사용하였다.

표 3. 장간애자의 목표 성능

평가항목	단위	성능
Rated Voltage	kV	DC 1500V
상용주파 주수 내전압	kV	65 (KSC 3801 7.3)
뇌충격 내전압	kV	180 (KSC 3801 7.8)
굽힘 파괴하중	N	3,100 이상 (KSC 3801 8.2.2)
인장 내하중	N	23,000 (KSC 3801 8.1.1)
아연도금시험	-	50 mg/cm ² 또는 70μm이상 (KSC 3801 12.1)
전파장에 전압시험	-	DC 1500V 10μV at 1000kHz
난연성	-	IEC 707 FV방법 FV 0에 적합할 것
표면누설거리	mm	600 이상

폴리머 애자에 요구되는 코아의 성능은 크랙이 발생하지 않으며, 취성파괴가 발생하지 않아야 하며, 절연파괴가 방지되어야 한다. 인발 제품의 내부에 크랙이 생성되면 강도의 저하뿐만 아니라 수분의 이동, 확산 현상으로 절연성능이 저하된다. 인발 성형시 금형 온도와 인발 속도 등에 의해 생성될 수 있으며 염료 침투 시험에 의해 쉽게 확인될 수 있다. 코아가 외부 하우징의 erosion이나 여러 손상요인에 의하여 노출될 때 외부환경의 영향으로 E glass가 부식되면서 발생한다. 이로 인해 폴

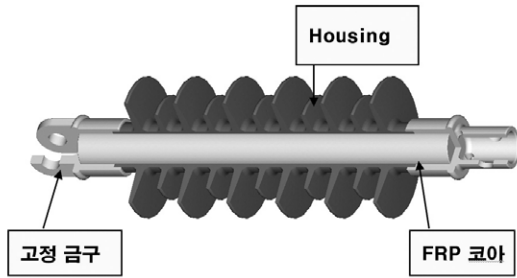


그림 4. FRP 장간애자의 기본구조

리머 애자의 기계적 파괴 현상은 설계하중의 10~15%의 낮은 하중에서도 발생할 수 있다.

하우징은 전기적 특성과 내오손 특성에 영향을 주는 섬락거리와 누설거리를 형성하는 부분으로 사용재료는 철도 및 한전선로에 장시간 사용하여 성능이 검증된 실리콘을 사용하였다. 실리콘 하우징은 기존 자기재에 비하여 섬락 및 누설거리를 증가시켜 오손특성을 향상 시키므로 유지보수 차원에서 보다 유리하도록 설계하였다. 고정금구는 애자와 지지부를 연결하는 부분으로 조립부 형상 및 치수를 기존 자기재와 동일하게 설계하여 애자의 교체설치 및 신규 설치 시에 호환이 가능하도록 설계하였다. 사용재료로는 폴리머애자의 연결금구로 가장 널리 사용 중인 구상흑연주철을 적용하여 주조방식으로 제조하였으며, 고정금구와 FRP 코어의 접합은 압착식 접합법을 적용하여 제작하였다. 표 4에 자기재 장간애자와 FRP 장간애자의 설계 사양을 비교하였다.

표 4. 자기재 장간애자와 FRP 장간애자의 설계 사양 비교

항 목	자기재 장간애자	FRP 장간애자	비 고
연결부 구조 및 치수	-	-	자기재 애자와 동일하게 적용
누설거리(mm)	658	970	47% 증가
섬락거리(mm)	319	340	6% 증가
절연부 외경(mm)	141	135	-
중량(kg)	7.8	4	50% 감소

3.2.2 지지애자의 설계

폴리머애자의 형상 설계 시에는 오손 섬락전압에 영향을 주는 요소들을 검토할 필요가 있다. 즉 애자의 표면이 어느 정도의 발수성을 유지하고 있는지에 대한 애자 표면의 표면 도전도, 또는 등가 염분부착밀도 (equivalent salt deposit density, ESDD), 애자의 길이, 애자의 누설거리 및 애자의 갭 형상 등이 고려되어야 한다. IEC 60815의 오염조건을 고려한 내염애자의 경우, 표 5에서와 같이 오염등급은 4단계로 나누어지

표 5. 오염등급별 오염량 및 누설거리

오염등급	SDD [mg/cm ²]	최소누설거리
I : Light	0.03 - 0.06	16mm/kV
II : Medium	0.10 - 0.20	20mm/kV
III : Heavy	0.30 - 0.60	25mm/kV
IV : Very heavy	0.60 이상	31mm/kV

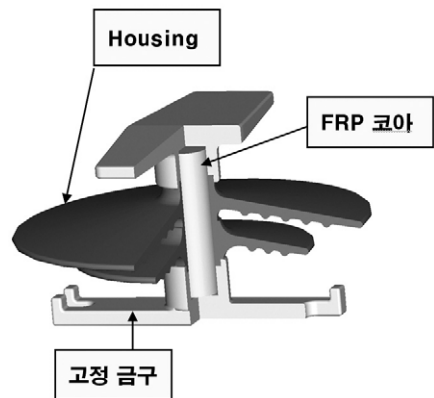


그림 5. FRP 지지애자의 기본구조

며, 오염등급이 very lightly polluted areas에서는 규정최소 누설거리가 16mm/kV 이하도 가능하나 최소한 12mm/kV 이상을 갖도록 설계되어야 한다.

FRP 지지애자의 구조는 그림 6과 같으며, 재료특성은 장간애자와 동일하게 설계하였다. 표 6과 표 7에 각각 FRP 지지애자의 목표 성능과 설계사양을 정리하였다.

표 6. 설계 사양 비교

항 목	자기재 장간애자	FRP 장간애자	비 고
누설거리 (mm)	295	390	30% 증가
섬락거리 (mm)	130	160	23% 증가
절연부 외경 (mm)	254	254	-
중량(kg)	6.1	3.8	40% 감소

표 7. 지지애자의 목표 성능

평가항목	단위	성능
Rated Voltage	kV	DC 1500V
상용주파건조섬락전압	kV	60 (KSC 3801 7.2)
상용주파주수섬락전압	kV	30 (KSC 3801 7.4)
50%충격섬락전압	kV	100 (KSC 3801 7.9)
뇌충격 내전압	kV	80 (KSC 3801 7.8)
굽힘 파괴하중	N	3,000 (KSC 3801 8.2.2)
인장파괴하중	N	5,000 (KSC 3801 8.2.1)
이연도금시험	-	50 mg/cm ² 또는 70μm이상 (KSC 3801 12.1)
전파장에 전압시험	-	DC 1500V 10μV at 1000kHz
난연성	-	IEC 707 FV방법 FV 0에 적합할 것
표면누설거리	mm	290

4. FRP 애자 제작 및 성능 시험

4.1 FRP 애자 제작

FRP 애자는 그림 7과 같이 설계에 따라 제작된 금형에 FRP 코어를 설치한후, 하우스징을 성형하는 과정으로 제작되었다. 제작 후 성형성과 FRP 코어 부분과 하우스징의 접착 상태를 검사하였으며, 모두 양호한 상태를 보여 주었다.

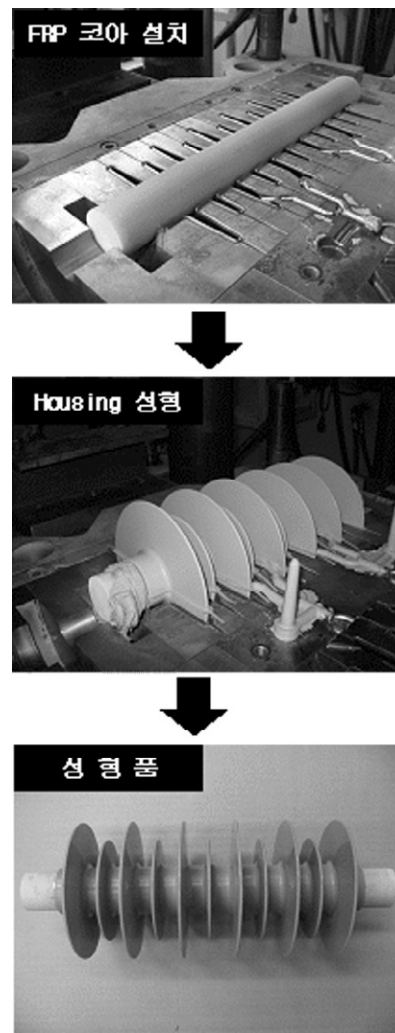


그림 6. FRP 애자 제작 과정

4.2 FRP 애자 성능 시험

제작된 FRP 애자의 성능 검증을 위한 형식시험을 실

시하였다. 현재 FRP 장간애자에 대한 형식시험만이 완료된 상태이며, FRP 지지 애자에 대한 형식시험은 진행 중인 상태이다. 또한, 1년간의 장기적인 거동 분석을 위하여, 개발 제품을 서울메트로의 차량지기 내에 설치하여 현장 시험을 진행 중인 상태이다. FRP 애자의 형식 시험은 표 3과 표 7에서 나타낸 바와 같이, 상용주파 건조 섬락전압, 상용주파 주수 섬락전압, 50%충격 섬락전압, 뇌충격(雷衝擊) 내전압, 굽힘 파괴 하중, 인장 파괴 하중 등이며, 시험 결과 모두 만족할 만한 성능을 나타내었다.

4.2.1 뇌충격(雷衝擊) 내전압시험

1.2×50 μs의 파형으로 정극성 및 부극성 충격전압 (180kV)을 각각 15회씩 인가하였을 때 파괴방전이 2회 이내이어야 하며, 시험결과 기준을 만족하였다.

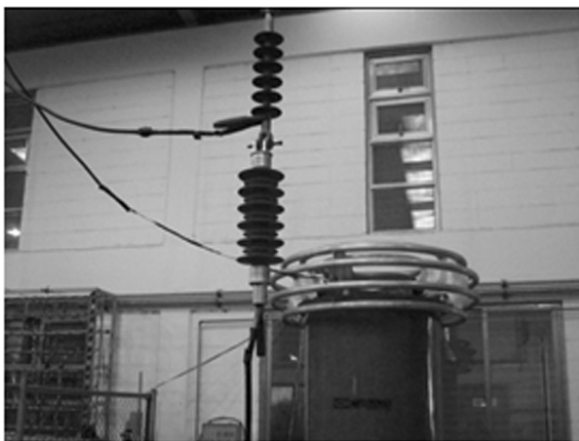


그림 7. FRP 장간애자 뇌충격 내전압 시험

4.2.2 수분 침투 시험

애자에 수분이 침투될 경우에는 절연성이 저하되므로, 이를 방지하여야 하며, 이때의 충격 전압에도 안전하여야 한다. 수분 침투 시험은 FRP 애자 시료를 0.1%의 NaCl 용액에서 42시간 동안 끓인 후 약 50℃로 냉각하여 유지하면서 48시간 이내에 평가시험을 실시한다.

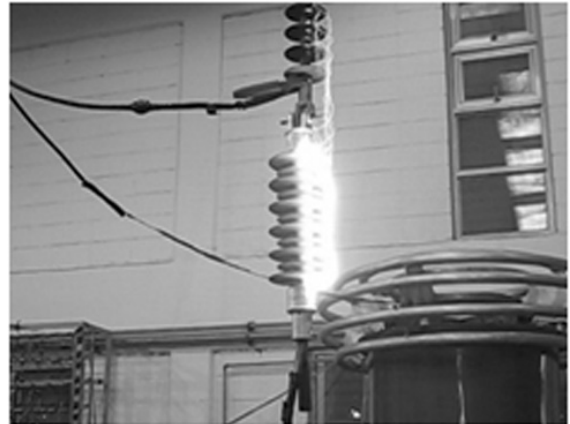


그림 8. FRP 장간애자 수분침투 전 건조섬락전압 시험

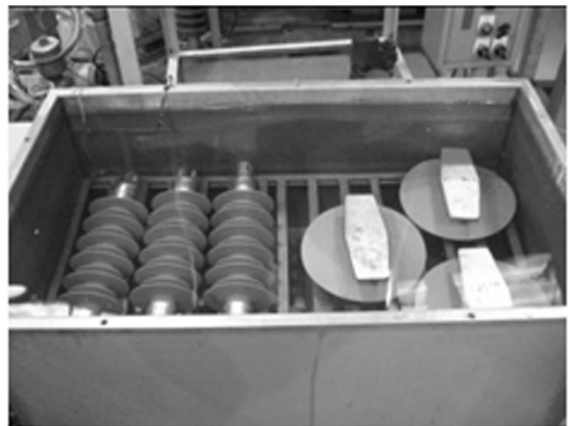


그림 9. FRP 장간애자 수분침투 시험

평가 시험은 준도 1,000kV/μs의 급준파 충격전압을 정, 부 각 25회씩 인가하여 외부섬락이 일어나지 않고, 관통파괴가 되지 않음을 확인하고, 상용주파 건조섬락전압시험과 상용주파 내전압 시험을 실시한다. 이를 통하여 5회 섬락전압 결과 값을 평균하고, 상용주파 건조섬락전압 평균치의 80% 전압으로 30분 인가하여 관통파괴가 발생하지 않고 시험 직후 제품 양단의 표면온도 상승이 20K이하로 나타나, 평가 기준을 만족하였다.

4.2.3 상용주파주수 내전압시험

인가전압은 시험전압(65kV)의 약 75%까지 전압을 상승시키고, 이후 매초 시험전압의 약 2%의 상승률로 상

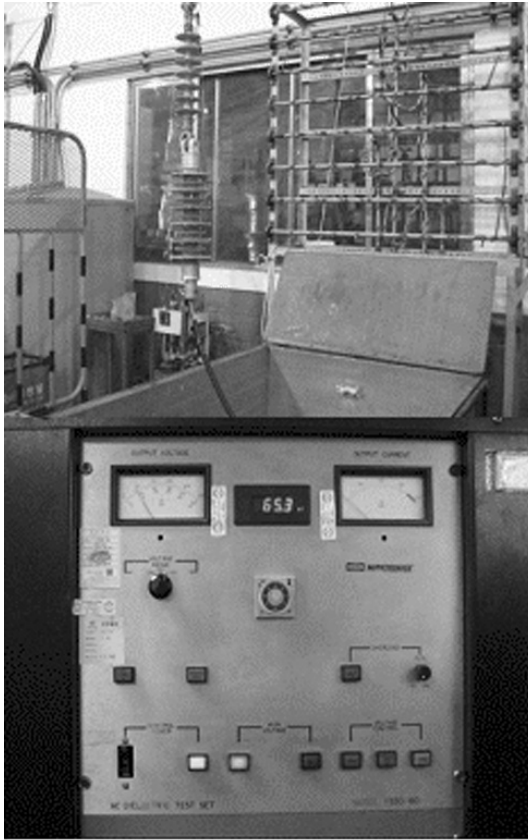


그림 10. FRP 장간애자 상용주파주수 내전압 시험

승시킨다. 규정의 전압을 1분간 인가하여 시험품에 섬락 또는 절연파괴 여부를 조사하였다. 주수율의 수직 및 수평 거리는 1~2 mm/min이며, 수저항율은 $100 \pm 15 \Omega \cdot m$ 이다.

4.2.4 인장 내하중 및 인장 파괴하중

인장 내하중의 경우에는 23 kN의 내하중 값의 75% 까지 가력하고, 이후에는 서서히 가력하여 내하중 값에 도달하도록 하고, 그 하중을 1분간 유지하고 시험품의 이상 유무를 조사한다. 시험결과 균열 및 파괴가 발생하지 않아 평가 기준을 만족하였다.

인장파괴하중 시험은 인장파괴하중 요구치(69 kN)의 75%까지 가력한 후, 이후에는 가력 속도를 낮춰 69 kN 까지 가력하여 파괴의 유무를 확인한다. 시험결과 요구

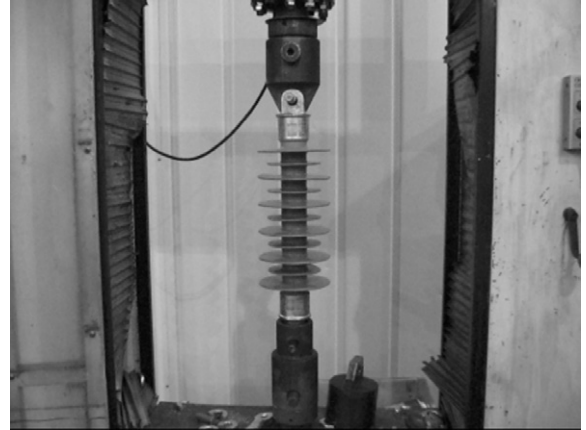


그림 11. FRP 장간애자 인장내하중 시험

하중인 69 kN에 도달할 때 까지 인장파괴가 발생하지 않아 시험 기준을 만족하였다.

4.3 FRP 애자 현장 설치 시험

개발된 직류용 FRP 지지애자, 장간애자의 실제 사용 환경과 운행특성에서 이상이 유무의 확인을 위한 장기 시험을 위하여 FRP 애자를 현장에 설치하였다. FRP 지지애자의 경우에는 3차에 걸친 시험을 계획하였으며, 각각 1차 시험은 열차운행에 직접적인 영향이 없는 장소에 2조를 설치하여 3개월간 시험 예정이며, 2차 시험은 1차 시험에서 일정부분 안전성 확인 후 열차운행 선로에 2조를 설치하여 6개월간의 시험으로 계획하였다. 3차 장기 시험은 열차운행이 빈번한 장소에 전차선을

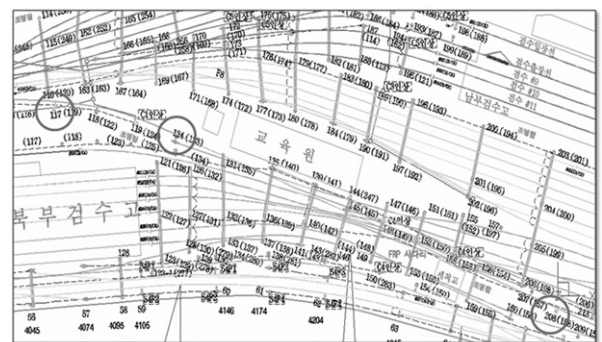


그림 12. FRP 장간 애자 설치 위치



그림 11. FRP 장간 애자 설치 전경

지지하지 않고 애자만 4조 설치하여 1년간 시험을 할 예정이다.

장간애자의 경우에는 지지 애자와는 달리 열차운행선로인 군자 차량기지 내 유치선에 1년간의 거동을 분석하기 위하여 3조를 바로 설치하였으며, 현재 계속 시험이 진행 중인 상태이다. 그림 13과 그림 14는 각각 FRP 장간 애자의 설치 위치와 전경을 보여준다.

5. 결론

직류를 사용하는 도시철도 급전선의 안전성 확보와 유지보수 비용절감을 위하여, 기존의 자기재 애자를 대체할 수 있는 FRP 애자를 개발하고 부분적인 성능 시험을 실시하였다. 시험 결과 FRP 애자의 구조적, 전기적 성능이 목표 성능을 만족하는 결과를 보여 주었으며, 장기 현장 시험을 위하여 현장에 FRP 애자를 설치하였다. 현재까지 복합신소재는 구조부재로의 적용성에 대하여 활발히 연구되어 왔으나, 복합신소재의 우수한 구조 성능 이외에도 절연성능을 고려하여, 전기재료로서의 활발한 연구를 기대하며, 우수한 절연특성과 구조 성능을 갖춘 복합신소재의 영역은 향후 더욱 확대될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. KRS 5970-3326 (지지애자)
2. KS C 3824 (전차선용 자기재 애자)
3. “장간애자 자재규격서” 1997년 12월 서울메트로.
4. “지지애자 자재규격서” 1997년 12월 서울메트로.
5. “시설물별 세부 정밀진단(현수애자)” 서울메트로.
6. 이재봉, 정호성, 이기원, 권삼영, 이기승, 조호령 (2008), “전차선로 절연물의 안전성 평가기준 검토” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2008.
7. 장동욱, 박현준, 이기원, 철도분야의 고분자 애자.
8. “154kV 및 345kV 송전용 폴리머 현수애자 기술 개발에 관한 연구 최종보고서” 2001년 12월 (주)평일.
9. “전차용 절연물 관련 세미나” 2008년 11월 전기연구원 조한구.
10. “직류용 FRP제 애자” 2008년 11월 서울도시철도공사 신인석.
11. “애자 현품 세척시험 결과 보고” 2007년 10월 한국철도공사.
12. Masafumi Mase, Kiyoshi Isogawa, Yasuo Sugawara, Daisuke Hanawa, “日立化成テクニカルレポート” No. 42(2004-1)
13. “デッドセクションの速度向上??策を考える,” 電力技術?究部(集電管理 主任?究員) / 菅原 淳, RRR 2003. 3.
14. “A Study of Reducing Strain of Contact Wire near a Dead Section(デッドセクションのトロリ線ひずみ?減策の?討), “철도총연보고 제16권 제6호 2002년 6월.
15. “Reduction of contact wire strain near dead sections by consifering sliding surface level differences”, Atsushi Sugahara, RTRI Quarterly Report, Vol. 45, No. 2, May 2004.