

카테나리 전차선로 현수애자의 환경부식에 따른 안전성 연구
A study on the safety of the Environment Corrosion of Suspension
Insulator of a Catenary Trolley Wire Systems

이재봉* 소선영**
Jae-Bong Lee, Sun-Young So

ABSTRACT

Suspension insulator in Catenary Trolley Wire Systems must have two characteristics, electric insulation and mechanical endurance. Because suspension insulator is used in supporting and insulating position between power supply parts and earth conducted supporting parts.

The insulator's electric characteristics can be influenced by surface pollution and damage from the environment such as humidity, dust, smoke, salt. etc. And, the insulating parts can be electrically short.

These electrically damaged insulator can cause serious accidents that have far-reaching effect. So appropriate management basis of suspension insulator is needed. And we present appropriate cleaning and the changing period of suspension insulator on the basis of actual data.

1. 서론

전차선로용 현수애자는 급전선, 조가선, 전차선 등의 가선 구성 요소와 이를 지지하는 곡선당김금구 등의 부속설비를 전주·빔, 완금 등에 지지 및 절연을 위하여 설치하며, 이러한 애자는 적절한 전기적 절연성능과 기계적인 강도가 요구되어 진다.

전차선로용 현수애자는 노출 환경에 대하여 대기 중의 습도, 분진, 매연, 염해 등에 의한 애자표면 오손으로 그 표면저항이 저하되어 누설전류의 증대에 따라 전기적 파괴를 발생시킬 우려가 있다.

이러한 애자의 파손은 지락, 단락사고 등으로 열차 운행에 심각한 영향을 줄 수가 있어 그 파급 영향이 크다고 볼 수 있다. 따라서 현재 현수애자의 부식 등의 현황을 파악하여 안전성을 제시하고 교체주기 및 청소주기 등을 검토하고자 한다.

* 정회원, 서울메트로 기술본부 전철팀 차장

E-mail : catenarysm@paran.com

TEL : (02)520-5870 FAX : (02)520-5868

** 정회원, 서울메트로 기술본부 전철팀 팀장

2. 본 론

2.1 서울메트로 전기설비 관리규정

- 애자의 종류(제23조)

전차선로에 사용하는 애자는 현수애자, 장간애자를 사용함을 원칙으로 한다. 다만, 편애자는 가공 공동지선등에서 필요한 개소에 사용한다.

- 애자의 사용구분(제24조)

애자는 전차선, 급전선, 지선등에 사용하며 공장지대, 공해지역에는 내 오손용 애자를 사용하거나 현수애자의 경우 그 수량을 늘려 설치한다.

- 애자의 사용수량(제25조)

애자의 사용에 따른 설치수량의 구분은 다음 표 1에 의한다. [1]

구 분	사 용 개 소		장간 애자	현수 애자	
				Φ 254	Φ 152, 180
전차선	가동브라켓트		2		
	현 수				2
	곡선당김금구				2
	Section Insulator				2
	전차선, 조가선 동시인류			2	
	전차선, 조가선 분리인류			4	
	흐름방지설비			4	
급전선	현 수				2
	인류	동시인류		2	
		분리인류			4
	급전분기(스펜션식)				4
지선	지선(전주)				2

표 1 현수애자의 설치수량

2.2 시험

2.2.1 현수애자의 구성과 재질

애자의 구성과 재질은 다음 표 2와 같다. [2]

구 성 부	재 질
애 자	면이 매끄러우며 윤기가 나는 양질의 밝은 회색빛 자기제
캡	연성의 주물재 - 인장강도 : 32kg/mm ² Min, 내력 : 19kg/mm ² Min, 신장율 : 8% Min
Bolt, Nut	일반구조용 압연강재 (용융아연도금재) - 인장강도 : 41kg/mm ² Min, 내력 : 25kg/mm ² Min, 신장율 : 8% Min
스프리트 핀	스테인레스강
시 멘 트	포틀랜드 시멘트

표 2. 애자의 구성 및 재질

2.2.2 애자 성능 시험

1) 시험시료의 선정 및 시험항목

애자류의 정밀진단을 실시하기에 앞서 현재 지하철 1~4호선에 설치되어진 애자를 표본 추출하여 이에 대한 전기적, 기계적 성능시험을 측정함으로써 향후 진행할 정밀점검에 기준으로 삼고자 하였고 시험시료는 각각 2개씩 표본 추출하여 시험을 실시하였다.

- 3호선 약수~압구정 간 : 152mm 현수애자 × 2개
- 2호선 신도림~신림 간 : 180mm 현수애자 × 2개
- 2호선 신정차량기지 : 180mm 현수애자 × 2개

시험항목은 KSC 3824(전차선로용 자기제 애자), KSC 3801(애자 시험방법)에 의하여 실시하였고 이는 그림 1, 표 3과 같이 서울메트로 「전차선자재표준사양서」에도 준하는 기준이다. [3]

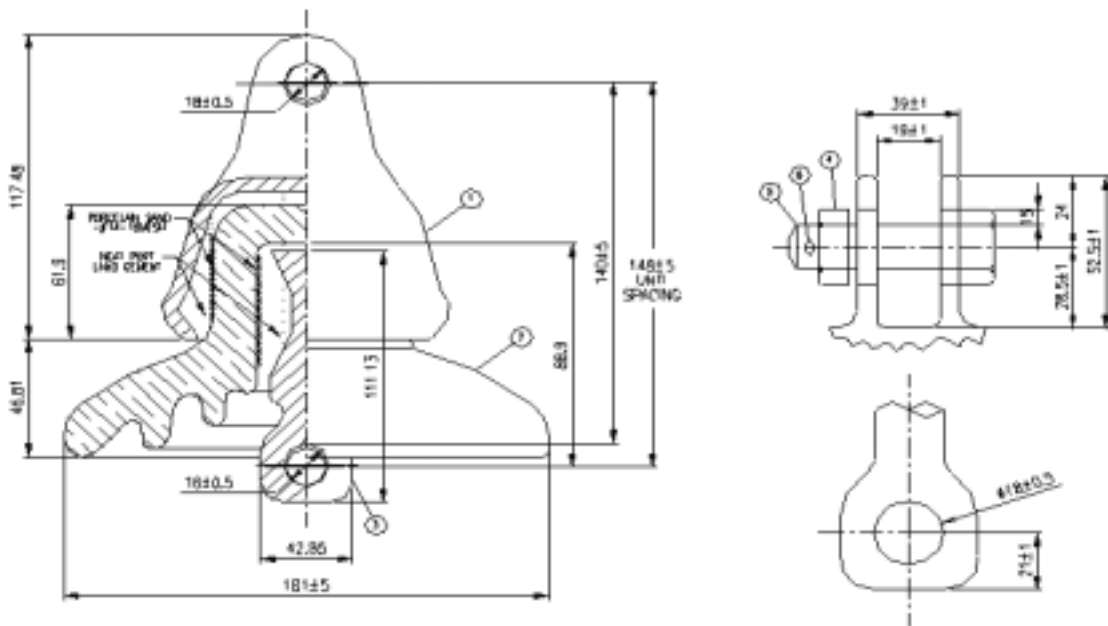


그림 1. 현수애자 180mm 외관

No	시험 항목	판정 기준	비고
1	외관 및 구조	사양과 일치하며 양호할 것	KSC 3801 4,5항
2	상용주파전압시험	24kV(180mm) 60Hz에 1분간 견딜 것 25kV(152mm) 60Hz에 1분간 견딜 것	KSC 3801 6,6항
3	뇌 임펄스내전압	75kV(1.2×50μs) 정,부극성 각 3회	KSC 3801 6,4항
4	인장하중	2,500kgf 이상일 것	KSC 3801 7,1,1항
5	파괴 인장하중	7,500kgf(180mm) 이상일 것 5,000kgf(152mm) 이상일 것	KSC 3801 7,1,1항

표 3. 현수애자 성능시험 기준

2) 시험결과

대상시료	외관 및 구조 ^{주1}	상용주파내전압	뇌임펄스내전압	인장하중	파괴인장하중	비고
대림#1	C등급	견딤	양호	견딤	6,555kgf	180mm
대림#2	C등급	견딤	양호	견딤	6,757kgf	180mm
신정#1	B등급	견딤	양호	견딤	7,110kgf	180mm
신정#2	A등급	견딤	양호	견딤	7,485kgf	180mm
옥수#1	C등급	견딤	양호	견딤	6,765kgf	152mm
옥수#2	C등급	견딤	양호	견딤	6,735kgf	152mm

※주1 : A등급 : 키퍼부식이 발생하지 않음
 B등급 : 키퍼부식 발생 및 부식정도 5mm이하
 C등급 : 키퍼부식 발생 및 부식정도 5mm이상

표 4. 현수애자 성능시험결과

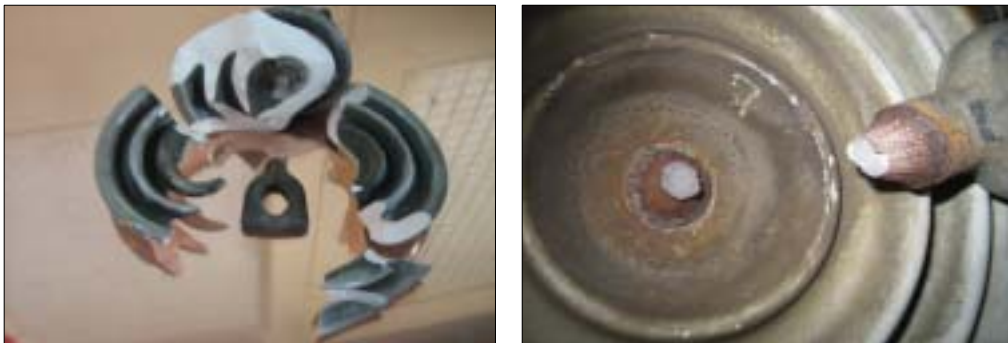


[키퍼 부식 B등급 : 신정#1]

[키퍼 부식 C등급 : 대림 #1]

그림 2. 현수애자 키퍼부위 부식상태

- 외관 및 구조 검사에 있어서 애자 키퍼의 부식이 있었으나 상용주파전압 및 뇌 임펄스 내전압 시험은 합격을 함
- 152mm, 180mm 모두 규정에서 정하는 인장하중 2,500kgf에는 견디었으나 파괴인장하중은 키퍼 부식 정도에 따라 다르게 나타남



[파괴하중시험 : 옥수 #2]

[파괴하중시험 : 대림 #1]

그림 3. 현수애자 파괴 하중시험

3) 애자성능 시험결과

구 분	결 과
전기적 시험	이상 없음
기계적 시험	불합격

위 표 4 및 그림 2,3의 시험에서 확인한 바와 같이 애자 키퍼 부식상태에 따라 파괴인장하중이 감소함을 알 수 있다. 특히 180mm 현수애자의 경우 키퍼부식이 C등급에서는 파괴인장하중 7,500kgf를 견디지 못하고 키퍼부위가 절단되었다. 따라서 금번 용역에서는 과업수행 구역내 애자에 대해서 A, B, C 등급별 진단을 실시하여 현재 현수애자의 현황을 파악한다. 그리고 이러한 부식이 발생하는 원인 및 방지대책을 제시하고자 한다. [4]

2.2.3 방사선 투과검사(RT : Radiographic Testing)

현수애자 키퍼부위의 부식상태가 애자 기계적 성능에 영향을 준다는 것을 상기 실험에서 검증하였다. 따라서 애자 키퍼부식이 외부에 한한것인지 아니면 내부 절연체까지 확장되고 있는 것인지를 검증하기 위해서 비파괴 검사인 방사선투과검사를 실시하였다.

당 검사에서는 180mm현수애자 신품과 C등급을 비교검사를 하였다.



[180mm 현수애자 RT측정]

[키퍼부위 확대도]

그림 4. 방사선 투과시험

검사결과 위 그림 4에서 보는 것과 같이 애자 키퍼부식은 애자 절연물 내부까지는 진행하지 않고 있으며 부식은 외부에서만 발생함을 알 수 있었다. 이는 애자의 부식이 외부적인 요소에 기인함을 유추할 수 있었다. [4]

2.3 애자 정밀육안 점검

정밀육안 점검대상 개소에 설치된 현수애자에 대해서 각 설치부위별로, 앞서 언급한 현수애자 키퍼부식 등급을 조사하였다. 조사 중에 부식상태가 심각하여 전철 안전운행에 지장을 줄 우려가 있다고 판정된 것은 현장에서 교체를 하는 방식으로 진행하였다.

2.4 점검대상

지상부 점검대상 개소에서 사용되는 애자류는 그림 5와 같이 급전선,급전분기,곡선당김금구,조가선 지지,지선 등에 사용되고 있으며 이러한 모든 애자에 대하여 키퍼부식 상태 및 자기부 소손 여부를 정밀점검을 실시하였다.

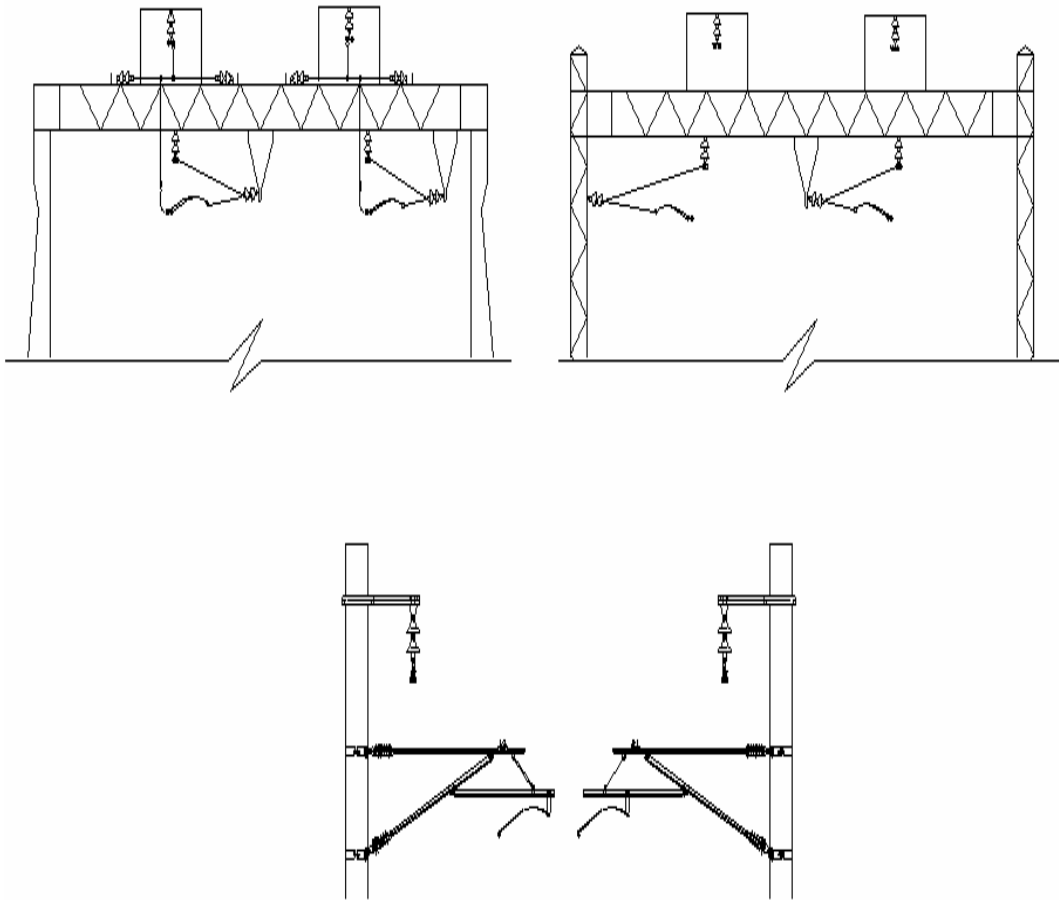


그림 5. 각 지지물별 애자류 점검대상 상세도

각 시설물별 점검 수량은 다음 표 5와 같다.

시설물별	총수량	분소별						비고
		합정	구의	대립	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(스펜션식)	340	40	48	76	116	40	20	
곡선당김금구 지지	884	36	94	116	394	202	42	
조가선 지지	988	38	94	118	468	230	40	
지 선	354	8	116	74	104	44	8	

표 5. 현수애자 수량현황

2.5 점검내용 및 결과

구분	진단 등급	시 설 물 별 애자 점검 결과						비 고
		계	급전선 지 지	급전분기	곡선당김 금구지 지	조가선 지 지	지선	
총 계	소 계	4,834	2,268	340	884	988	354	
	A등급	960	518	70	119	126	127	
	B등급	1,589	308	225	488	381	187	
	C등급	2,285	1,442	45	277	481	40	
합 정	소 계	194	72	40	36	38	8	
	A등급	15	5	4	2	2	2	
	B등급	41	11	24	0	0	6	
	C등급	138	56	12	34	36	0	
구 의	소 계	1,180	828	48	94	94	116	
	A등급	539	337	28	68	74	32	
	B등급	148	45	18	15	12	58	
	C등급	493	446	2	11	8	26	
대 립	소 계	900	516	76	116	118	74	
	A등급	88	10	14	8	12	44	
	B등급	234	49	59	57	45	24	
	C등급	578	457	3	51	61	6	
군 차	소 계	1,796	714	116	394	468	104	
	A등급	273	166	20	22	34	31	
	B등급	512	91	72	206	78	65	
	C등급	1,011	457	24	166	356	8	
신 정	소 계	594	78	40	202	230	44	
	A등급	32	0	0	16	2	14	
	B등급	540	60	40	184	226	30	
	C등급	22	18	0	2	2	0	
신 답	소 계	170	60	20	42	40	8	
	A등급	13	0	4	3	2	4	
	B등급	114	52	12	26	20	4	
	C등급	43	8	4	13	18	0	

표 6. 현수애자 등급별 현황

애자의 시설물별 점검 결과를 진단등급 A, B, C 등급별 현황은 표 6과 같이 조사되었다.

항목 등급	계	급전선 지 지	급전분기	곡선당김 금구지 지	조가선 지 지	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%

표 7. 현수애자 부식 분포율

위 표 7을 보면 전체 시설물에 설치된 애자에서 교체가 요구되는 C등급이 차지하는 비율이 47.3%로 거의 과반수에 미치고 있음을 알 수 있다. 특히, 용도별로 보면 급전선 지지애자의 경우 약 63.6%로 부식상태가 심각한 상태이므로 조기 교체가 이뤄져야 할 것이다.

그 다음으로는 조가선 지지애자, 곡선당김금구 지지애자, 급전분기, 지선 애자 순으로 전기적이 스트레스가 많이 작용하는 개소일 수로 부식이 많이 진행되고 있음이 조사되었다.

2.6 애자의 부식 및 청소주기

2.6.1 애자의 부식

애자는 정확한 수명이 얼마라고 정의를 내리기가 힘들다. 이는 설치된 장소, 용도 등 여러 내부적, 외부적인 요인에 따라 다르기 때문이다. 애자의 구성을 보면 전기적 절연체인 자기부분과 지지하는 금속부로 나뉘질 수 있다. 자기부분의 경우 원칙적으로 열화가 되지 않은 성분이므로 수명이 없다고 할 수 있다. 그러나 직격뇌 등의 외부적 충격이나 제조상의 결함으로 인한 균열 등이 발생할 수 있다.

이것은 예측이 불가능한 요소이므로 지속적인 유지보수에 의해서 해결할 수밖에 없다. 금속부분의 경우 금속도금의 내구년한으로써 수명을 판단할 수밖에 없으므로 보통 애자의 수명이라고 하면 금속부분을 기준한다. 일반적으로 사용하고 있는 애자의 경우 금속부분에 용융아연도금을 실시하고 있다. 이러한 용융아연도금의 내용년수를 추정하면 표 8과 같다.

환경 \ 도금 부착량	400g/m ²		500g/m ²		600g/m ²		600g/m ² (구운 것)	
	부식량 (g/m ² /년)	내용년수	부식량 (g/m ² /년)	내용년수	부식량 (g/m ² /년)	내용년수	부식량 (g/m ² /년)	내용년수
중공업지역	40.1	9	40.5	11	40.1	13	18.1	30
해안지역	10.8	33	10.9	61	10.8	50	11.5	47
교외지역	5.6	67	6.2	86	5.2	104	5.2	104
도시지역	17.5	21		25	17.7	30	17.5	31

주 : 상기내용은 일본 아연도금협회가 10년간 대기중 측정된 자료임

표 8. 지역별 용융아연도금 내용년수 현황

이러한 내용년수도 설치된 장소의 강우량 등의 환경 및 청소상태 등에 따라 달라질 수가 있다.

현재 서울메트로에서 사용하고 있는 전차선 금구의 아연도금 부착량은 50mg/cm²이므로 위 표에서 나타난 내용년수 보다 짧게 된다. 애자에 부착된 50mg/cm²의 아연도금의 두께는 대략 0.008mm이다.

애자의 금속부는 부식과 전식이 발생하게 되는데 일반적인 지역에서는 0.0003mm/년의 전식과 0.0005mm/년의 자연부식이 일어난다. 따라서 아연도금 두께가 0.008mm이므로

$$\frac{0.008}{(0.0003 + 0.0005)} = 10 [Years] \text{이 된다.}$$

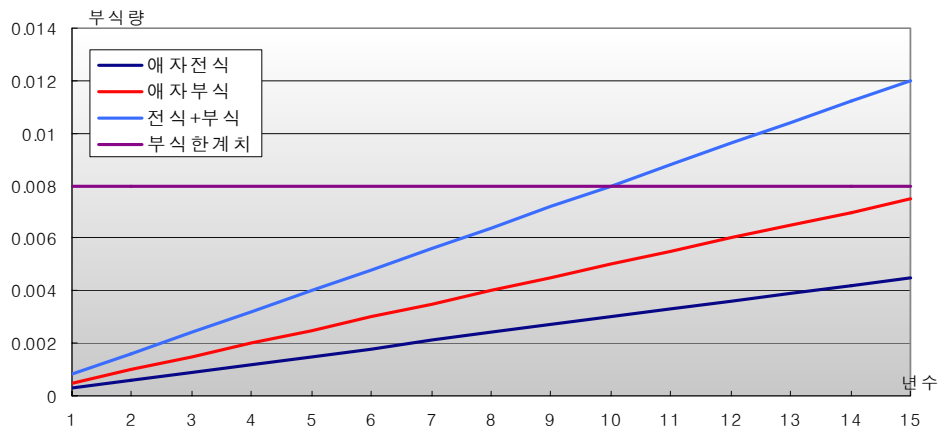


그림 6. 애자의 용융아연도금 부식 한계년수

즉, 위 그림 6에서 보는 것과 같이 10년 만에 아연도금은 없어지고 그 이후에는 철의 자연부식이 시작되며 그 후 약 10년 만에 한계치인 0.009mm(허용강도)에 도달해 버린다.

불량애자 등으로 누설전류가 심한 곳에서는 아연도금이 4~5년만에 없어지므로 불량애자를 그대로 방치하면 애자연결 금구의 수명은 14~20년이 된다고 추정된다.

현재 서울메트로에 시공된 현수애자 등은 설치 년수가 25년이 넘은 것이 상당수 포함되어있다. 따라서 이러한 현수애자는 아연부식 및 강의 부식까지 이뤄져서 애자의 안정성 확보에 문제가 있다라고 볼 수 있다.

참고로 일본국에서는 애자의 볼트 핀 및 설치금구의 수명을 20년으로 보고 있다.

2.6.2 애자의 검사 및 판정

현재 국내에는 현수애자 및 장간애자의 정밀진단방법 및 점검결과에 대한 정확한 판정기준이 제정되어 있지는 않다.

물론 한국표준공업규격에 정하는 시험을 하여 그 양부를 판정할 수는 있지만 현업에서 일일이 적용하기에는 무리가 따른다. 이에 현재 일본국 철도사업자 및 제조업체가 적용하고 있는 판정 사례를 살펴보고자 한다. 애자의 양부 판정은 자기부와 핀 및 취부부위에 대한 판정으로 구분한다.

구 분	교 체 기 준	
	자 기 부	핀 및 취부부위
철도사업자	-	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 핀부:지름(표준Φ18) - 인류 14.3mm이하 - 기타 10.0mm이하 ◦ 취부부위(코터핀):지름(표준M16) - 16mm이하
제조 업체	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 현수애자:1골까지 손상, 균열 ◦ 장간애자:손상, 균열 ◦ 애자공통:등가염분부착량: 0.03mg/cm²초과 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 핀부:지름(표준Φ18) - 인류 12.8mm이하 - 기타 8.0mm이하 ◦ 취부부위(코터핀):지름(표준M16) - 12mm이하

표 9. 현수애자 교체기준

위 표 9에서 보면 일본국의 철도사업자는 제조업체가 권장하는 교체 기준보다 강화된 기준을 적용함을 알 수 있다.

2.6.3 애자의 청소주기

지상부 및 지하부에 설치된 애자의 경우 많은 비산 먼지 및 오염 물질에 의해서 자기 표면에 많은 이물질들이 부착되게 된다.

이물질들은 애자 자체의 절연성능을 저하시키고 금속부의 부식을 촉진시키는 역할을 한다. 따라서 이러한 이물질에 대한 오손대책이 필요하다고 할 수 있으나 직류 방식의 전기철도에서는 애자의 오손대책보다는 오히려 유도도에 의한 절연과피가 문제가 된다. 이러한 문제 때문에 실제 사용전압이 직류 1500V이지만 현수애자 180mm 2개연 사용을 표준으로 하고 있다. 그러므로 직류구간에서는 교류구간 처럼 오손구분에 의한 애자종별, 개수의 사용구분이 크게 의미는 없다.

그리고 지상부에 위치한 애자의 경우 강우에 의한 비 씻김 효과가 있어 자연적인 청소가 이뤄질 수 있다. 강우량에 따른 애자의 세척 효과와 서울의 평균 강수량은 표 10, 11과 같다.

서울의 경우 1, 2, 12월을 제외하고는 평균 강수량이 매월 30mm이상 내려서 현수애자 상면과 장간애자의 경우 약 90%이상의 비 씻김 효과를 볼 수 있다. 따라서 동절기 1~12월 사이에 연 1회에 청소를 실시하는 것이 효과적이라고 판단된다.

강우량	현수애자(하면)	현수애자(상면) 장간애자
2mm	15%	50%
5mm	25%	80%
10mm	40%	90%
15mm	45%	90%
20mm	50%	90%
30mm이상	60%	90%

표 10. 현수애자의 비 씻김 효과

구분	강수량	구분	강수량
1월	22.9mm	7월	369.1mm
2월	24.6mm	8월	293.9mm
3월	46.7mm	9월	168.9mm
4월	93.7mm	10월	49.4mm
5월	92.0mm	11월	53.1mm
6월	133.8mm	12월	21.7mm

표 11. 서울의 평균 강수량

특히 동절기에는 제설용 염화칼슘 등을 뿌려서 날씨가 맑은 날 이들 성분이 증발 후 애자에 부착, 애자 금구의 부식을 촉진시킨다.

일본국의 사례에서 보듯이 서울메트로 지상 구간의 경우 대부분이 4차선이상의 도로 상부 고가교 형식으로 되어 있기 때문에 이에 대한 대책으로도 동절기 1회 청소가 요구된다.

그러나 지하부에 설치된 강체전차선로 지지애자의 경우 밀폐된 공간에서 차량의 운행으로 발생하는 비산먼지 및 이물질이 그대로 쌓이게 되고 비씻김 효과 등을 볼 수가 없으므로 년 2회의 청소가 필요하다.

- 지상부 전차선로 : 년 1회 실시(동절기)
- 지하부 전차선로 : 년 2회 실시

3. 결론

현재 설치되진 현수애자의 경우 전기적인 성능에는 문제가 없으나 기계적인 강도 유지에 문제가 있다고 볼 수 있다. 설치 년수가 오래되어 애자 키퍼부분의 부식상태가 심각하여 교체대상인 C등급(키퍼부위 5mm이상 부식)이 47.3%로 조사되었다 특히 급전선 현수애자의 경우 63.6%로 빠른 교체가 요구된다.

1) 애자 정밀점검 등급별 조치사항

- C등급 : 빠른 시일내 교체 요망 특히 급전선 지지애자의 경우 우선 교체 요망
- A, B 등급 : 지속적인 유지관리 요망

2) 정기점검시 애자의 키퍼부위 직경 측정

향후 지속적인 유지보수를 위하여 애자의 키퍼부위 직경을 측정하여 부식의 경향을 관리하여야 한다.

3) 지상부 년 1회, 지하부 년 2회의 청소 실시

애자의 표면 및 하부에 쌓이는 이물질은 애자의 절연성능 및 기계적 성능을 저해하므로 주기적인 청소가 필요하다. 따라서 지상부의 경우 비 씻김 효과가 적은 동절기에 실시하며 청소 시 애자의 하부면의 청소 효과를 높이도록 한다.

참고문헌

- [1] 서울메트로 전기설비 관리규정(2004. 4.), pp. 7
- [2] 서울메트로 전차선설비과정 교재(2006. 2.), pp. 141
- [3] 서울메트로 전차선 자재 표준사양서(1992. 9.), pp. 23-30
- [4] 지하철 1~4호선 전력설비 정밀안전진단 용역보고서(2005. 9.), pp. 전차선 11-24