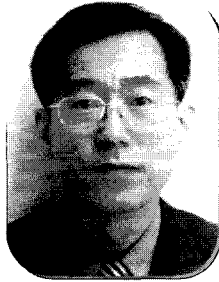


전철용 고분자 애자 및 열화특성



장동욱
한국철도기술연구원
전기·신호연구본부
주임연구원



박현준
한국철도기술연구원
전기·신호연구본부
본부장



최종선
홍익대
전기정보제어공학과
교수



김정수
홍익대
전기정보제어공학과
 명예교수

1. 서론

전기철도에 있어서 전차선로의 유지보수 작업은 이른바 3D작업에 속하며, 최근 노동력부족과 함께 자동화, 기계화가 대두되고 있다. 한편, 최근의 기술혁신에 의해서 설비의 상태감시, 검측의 자동화, 작업의 기계화, 신소재의 출현 등 설비보전의 근대화를 지탱하는 기술이 급속히 발달되고 있다. 전차선로 설비의 전기절연재료에는 이전부터 사용되던 자기애자가 내충격에 결함이 있어 파괴되기 쉬우며 또한 무겁기 때문에 취급에 주의를 요하며, 작업성에 어려움이 있다. 또, 해안주변의 설비에서는 염해, 터널에서는 분진의 퇴적에 의한 섬락방지를 위해서 정기적인 세척이나 실리콘 그리스의 도포가 필요하다.

최근에 유럽을 중심으로 도입이 진행되고 있는 옥외 고분자 절연재료를 이용한 고분자 애자의 우수한 내오손성, 경량성에 주목하고 철도분야에서의 애자 유지보수의 생력화와 시공성의 향상을 위해서 고분자 애자가 개발되어 시공되고 있다.

2. 고분자 애자의 개발

2.1 고분자 애자의 역사

옥외 고분자 애자의 개발은 최초로 실시한 것은 미국의 GE사이며 1950년대 들어서 지환식에폭시수지를 이용한 고분자 애자를 개발하고, 1960년대에는 송전선용, 배전용 애자 등으로 보급되었지만, 애자 갯부분에 크랙이 발생하는 것이 알려져서 급속하게 사용되지 않게 되었다.

1970년대에는 FRP(Fiber Reinforced Plastic)rod를 심재로 한 송전선용 고분자 애자 구조가 고안되고 실선로로의 적용이 시작되었다. 이후 고분자 애자는 모두가 이러한 형태인 심재의 외측 갯부분 커버의 재질로 분류되도록 되었다. 1970년대 후반에는 레이캄사가 옥외 케이블 말단용 고분자 재질로하여 개발한 EVA(Ethylene Vinyl Acetate)를 활용한 고분자 애자가 영국지하철에 채용되었다.

1980년대에 이탈리아에서 PTFE(poly tetra fluoro ethylene)애자가 개발되고 주로 전차선로에 사용되었지만 갯 부분의 전기 관통의 문제로 생산이 중지되었다. 또 미국에서는 충격에 대한 대책으로 고강도 애자의 필요성에서 EPDM(ethylene propylene diene terpolymer), 실리콘 고무의 고분자 애자가 개발되어

배전에서 230 kV급으로 적용이 확대되었다.

1990년대 이후에는 복미를 중심으로 급속히 적용이 진행되고 있으며 230 kV급이하의 신설 송전에서는 현재 약 80%가 고분자화 되고 있으며, 충격 대책으로 애자 세정비용의 저감에 기여하고 있다는 보고가 있다. 더욱이 실리콘 고무 외피의 경우에는 방전 스트레스 등으로 일단 상실된 발수성이 회복한다고 하는 독특한 특성이 있다. 발수성이란 표면에 부착된 물을 구슬과 같이 둥글게 하는 성질을 말한다. 애자 표면에 발수성이 유지되면 오손 습윤 상태에 있어서도 애자표면에 연속한 수막이 형성되기 때문에 높은 내전압특성을 보유하게 된다. 실리콘 고무의 발수성은 일단 상실하여도 LMW(Low Molecular Weight : 저분자량)이 표면으로 나오는 것에 의해서 회복하는 것이 알려져 있다. 또, 실리콘 고무는 주쇄의 결합에너지가 높고, 내열, 내후성에도 우수하기 때문에 고분자 애자 외피재료로서 가장 적용되고 있다고 생각된다.

2.2 해외의 고분자 애자 사용사례

고분자 애자 사용은 전세계적으로 점점 증가하는 추세에 있다. 미국에서는 송배전 선로에만 전체 애자의 약 30%를 고분자 애자로 사용하고 있으며, 유럽국가들 중에서도 영국, 프랑스, 이탈리아, 덴마크, 스위스, 노르웨이, 헝가리 등이 송배전선로 뿐만 아니라 전철용으로도 상당수 사용하고 있다. 또한 아시아 지역에서도 일본을 비롯하여 중국에서도 많이 사용하고

있는 실정이다.

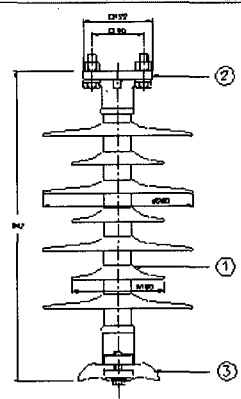
특히, 일본에서는 1985년에 전력중앙연구소가 옥외 전력용 케이블 말단에서 세계적인 지분을 갖는 레이캬사의 고분자 재료를 이용하여 전력기기로의 연구를 개시하였다. 또한 EVA재료를 갖하우징으로 사용한 고분자 애자의 개발에 따라서 전력중앙연구소나 철도종합기술연구소(JR총연)에서 각종 고분자 재료를 사용한 고분자 애자의 옥외 과전폭로시험이 개시되었다. 일본에서는 철도분야가 선행하여 경량에서 내오손성능에 우수한 고분자 애자를 채용하고 시공작업의 합리화나 유지보수 비용의 저감을 도모하여 철도분야에서는 이미 본격적인 고분자 애자의 시대에 접어들었다고 할 수 있다.

2.3 국내에서의 고분자 애자 도입 경위

국내에서는 고분자 애자를 선호하는 세계적인 추세에 따라 20년 전부터 한국전력을 중심으로 고분자 애자의 적용을 검토하였고 일부 배전선로에 1990년대 초반부터 외자로 도입하여 외국제품을 수입하여 시험 사용한 결과 아무런 문제없이 우수한 특성을 나타내었으며, 1997년부터 국산품이 시사용품을 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

표 1. 지지애자 성능 및 형상.

특 성		단 위	정 격	애자형상
치 수	표면누설거리	mm	1,100 이상	
기계적 성능	굽힘파괴하중	kg · m	710 이상	
	인장내하중(1분간)	kg	4,000 이상	
전기적 성능	상용주파 건조섬락전압	kV	200	
	상용주파 주수섬락전압	kV	150	
	50%충격섬락전압	kV	320 이상	
전파장애 전압	상용주파 대지간	r.m.s kV	25	
	최대 전파장해전압	µV at 1000 kHz	10	





1998년 고분자 장간애자의 실용화가 가능하게 되었다. 현재에 전차선로에 사용되고 있는 고분자 애자는 지지애자와 장간애자가 사용되고 있다.

3. 전차선로용 고분자 애자

3.1. 지지애자

전차선로의 AT급전선 및 보호선의 지지를 위해 사용하는 애자를 말하며, 고분자 지지애자는 NSP-50가

표 2. 장간애자(N-a Type)성능 및 형상.

특 성		단 위	정 격	애자형상
치 수	표면누설거리	mm	A-B : 1,400 이상 C-D : 240 이상	
기계적 성능	굽힘파괴하중	kgf	190 이상	
	인장내하중(1분간)	kgf	5,600 이상	
전기적 성능	건조섬락전압	kV	A-B : 250 이상 C-D : 80 이상	
	주수섬락전압	kV	A-B : 200 이상 C-D : 55 이상	
	50%충격섬락전압	kV	A-B : 400 이상 C-D : 110 이상	
전파장애 전압	상용주파 대지간	r.m.s kV	25	
	최대 전파장해전압	μV at 1000 kHz	10	

표 3. 장간애자(Type-m)성능 및 형상.

특 성		단 위	정 격	애자형상
치 수	표면누설거리	mm	A-B : 1,250 이상 C-D : 230 이상	
기계적 성능	굽힘파괴하중	kgf-m	350 이상	
	인장내하중(1분간)	kgf	6,000 이상	
전기적 성능	건조섬락전압	kV	A-B : 230 이상 C-D : 70 이상	
	주수섬락전압	kV	A-B : 180 이상 C-D : 50 이상	
	50%충격섬락전압	kV	A-B : 380 이상 C-D : 100 이상	
전파장애 전압	상용주파 대지간	r.m.s kV	25	
	최대 전파장해전압	μV at 1000 kHz	10	

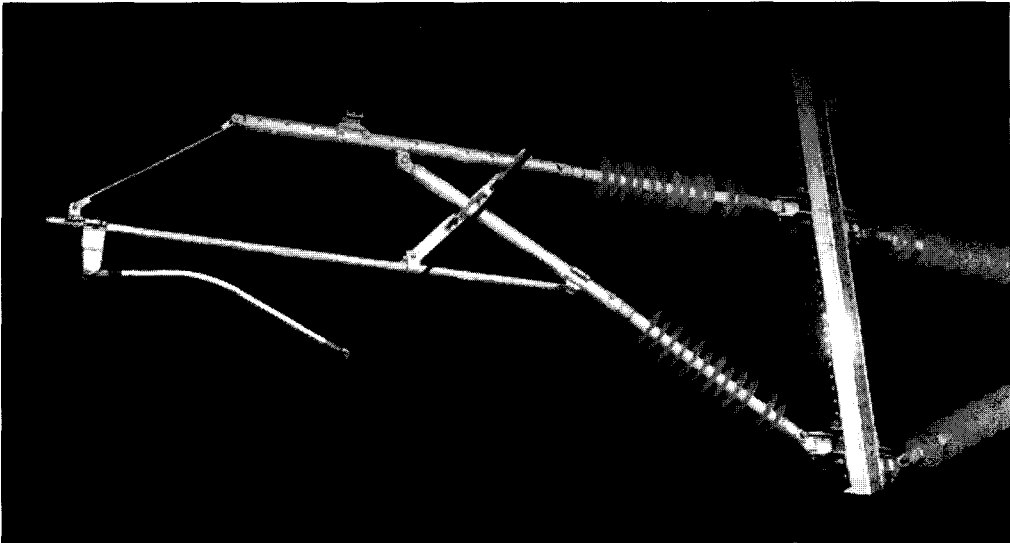


그림 1. 역구내에 설치된 고분자 장간애자(Type-m).

있으며, 애자의 호칭은 사용전압과 기호로 표시한다.

3.2 장간애자(전철용고분자 N-a)
25 kV전차선로의 인장개소에 사용하는 것이다.

3.3 장간애자(전철용 고분자 Type-m)
가동 브라케트에 설치하여 사용하는 것으로 아래 표에 성능 및 형상을 나타내었다.

4. 고분자 애자용 외피재료의 열화특성

4.1 외피고무의 역할과 필요특성

고분자 애자의 구조를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 외피고무는 햇빛, 비바람에 노출된다. 또, 표면에서는 아크방전이나 코로나 방전 등도 일어난다. 이와 같은 사용상에 비추어, 외피고무에 필요한 특성을 그림 3에 정리하였다. 그림 3에서 보면, 외피고무의 역할로서는 다음의 2가지를 들 수 있다.

4.1.1 FRP 코어의 보호

일반적으로 FRP 코어는 유리섬유와 에폭시 등의 유기수지로 된다. 이러한 유기수지는 전기절연성이 있는 것으로, 내후성이 적어 옥외에서의 용도로는 사

용할 수 없다. 또, 방전에 의해 쉽게 트랙킹을 일으킨다. 따라서 FRP 코어를 충분한 두께를 갖는 내후성에 탁월한 외피 고무로 보호하는 것이 필요하다. 더구나 FRP코어와 외피 고무 계면에 물이 잔류한다면 그 부분에서의 방전에 의해 FRP코어가 트랙킹을 일으키기 때문에 외피 고무는 FRP 코어와 완전히 접촉시켜 계면에 공간을 만들지 않는 것도 중요하다.

4.1.2 누설거리 확보

고분자 애자에서는 다양한 형태의 갓을 외피고무에 의해 형성되고 각 사용 환경에 따른 누설거리를 확보한다. 따라서 쉽게 형성할 수 있는 것은 물론, 변형이나 방전에 의한 파괴가 일어나지 않는 것도 요구된다.

상기 두 가지의 역할을 장기간 안정적으로 만족시키기 위한 외피 고무의 필요성으로는 다음 3가지 점이 있다.

① 내후성

외피 고무는 자외선, 비바람에 노출되기 때문에 이러한 자극에 대한 충분한 내성이 요구된다. 내자외선 성이라는 관점에서 보면 주쇄의 결합에너지가 큰 실리콘 고무는 EPDM이나 EPDM에 실리콘 오일을 첨가한 EP-Alloy보다 우수하다고 할 수 있다.

② 기계적 강도

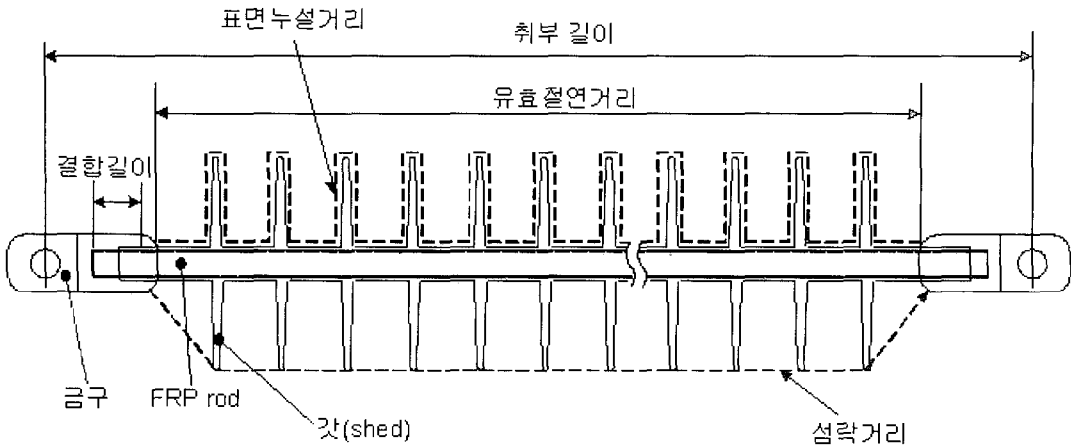
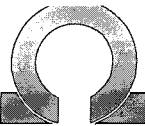


그림 2. 고분자제 장간애자 구조.

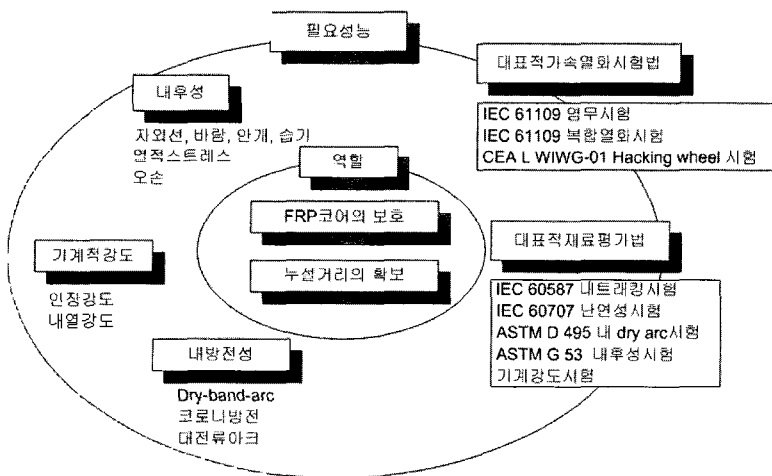


그림 3. 고분자 애자용 외피 고무의 역할과 필요성능.

애자의 취급 중에 갓부분이 절단되거나, 새들의 습격으로 FRP 코어의 노출됨도 고려되므로, 외피고무에는 충분한 인장강도, 인열강도가 요구된다. 이러한 기계적 강도는 충전제의 양에 따라서 실용상 충분한 강도로 조정가능하다.

③ 내방전성

외피 표면에서는 arc방전이나 corona방전이 일어나므로, 이러한 전기적 자극에 대해서도 충분한 내성을 갖도록 해야만 한다. 성능이 불충분한 외피 고무의 경우 dry-band arc에 의한 트랙킹, erosion, corona방

전에 의한 트랙킹 등을 일으킬 수 있다. 또는 외피 arc 시에도 트랙킹을 일으키지 않는 것이 필요하다. 내방전특성을 향상시키기 위한 가장 유효한 수단은 ATH(alumina Tri-Hydrate : 알루미늄삼수화물 ; Al₂O₃·3H₂O 또는 Al(OH)₃)라고 부르는 충전제를 첨가하는 것이다.

위에서 서술한 것 외에 내열성이나 오손 내전압 특성도 불가결한 성능이다.

이러한 성능을 평가하는 수단으로서 실제품에서는 염무, tracking wheel시험 등의 인공가속열화시험, 시

험편은 IEC60587에 대표되는 내트랙킹 시험이나 난연성 시험 등이 있다.

4.2 외피 고무의 조성과 특징

그림 4에 실리콘 고무, EPDM 및 EP-Alloy의 조성 과 고분자 분자 구조를 나타내었다. 이러한 고분자 애 자들은 외피 고무는 고분자 부분, 기계적 강도를 나타 내기 위한 실리카 및 내트랙킹, erosion 특성 향상을 위한 ATH로 된다. EPDM, EP-Alloy의 경우는 실리카 가 없는 것도 고분자 애자 외피에 요구되는 기계적 강 도는 나타낼 수 있다. EP-Alloy의 경우, 첨가되는 실리 콘 오일은 소량이며, 기본적으로 EPDM과 같다고 생 각할 수 있다.

※ 고분자 분자의 구조

그림 4와 같이 실리콘 고분자와 EPDM, EP-Alloy는 그 골격이 다르다. 실리콘 고분자의 주쇄는 실록산 결 합 -(Si-O)-이며, 측쇄로 메틸기 -CH₃가 있다. EPDM, EP-Alloy의 경우는 주쇄가 탄소-탄소결합 -(C-C)-, 측 쇠가 수소 또는 메틸기이다. 각 주쇄의 결합에너지와 공유결합성을 표 1에 나타낸다. 이것보다 실리콘 고분 자 주쇄의 1분자당 결합에너지는 7.37×10^{-19} J(4.60 eV)로, EPDM과 EP-Alloy의 5.91×10^{-19} J(3.69 eV)보 다 높다. 자외선의 대표적 파장 300 nm의 에너지가 6.62×10^{-19} J(4.13 eV)이며, 이 에너지에 의해서 EPDM, EP-Alloy의 주쇄는 절단되지만, 실리콘 고분 자의 주쇄는 절단되지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 내후성(내자외선성)의 면에서 실리콘고무가 EPDM 및 EP-Alloy보다 탁월하다는 것은 밝혀졌다. 반면 실 리콘 고분자 주쇄는 이온결합의 비율이 51%로 높고, 강산 등으로의 내성은 일반적으로는 EPDM, EP-Alloy 가 약간 우수하지만, 조성의 최적화에 의한 EPDM, EP-Alloy와 같은 정도까지 성능을 개선할 수 있다.

4.3 외피고무의 열화형태와 그 인자

4.3.1 외피 고무의 열화 형태

외피 고무의 열화형태로서 트랙킹, erosion(침식), crack, 갓 관통을 들 수 있다. 각각의 사진을 그림 5에 나타낸다.

(1) tracking

정의에 대해서는 ANSI C29.11, IEC Pub.61109 등에


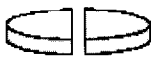
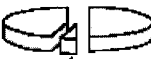
외피고무	고무구성	고분자 구조
실리콘 고무	충진제 실리콘 첨가제 고분자 	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{---Si---O---} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$
EPDM	충진제 EPDM 첨가제 고분자 	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \text{ H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$ $\left[\begin{array}{c} \text{H} \text{ H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_m$
EP-Alloy	충진제 EPDM 첨가제 고분자  실리콘 고분자	

그림 4. 외피고무 구성과 고분자 분자의 구조.

표 4. 실리콘 고분자와 EPDM, EP-Alloy 주쇄결합에너지 및 공유결합성.

결합종류		결합에너지[J, eV]	공유결합성[%]
Si-O	실리콘 고분자	7.37×10^{-19} (4.60)	49
C-C	EPDM EP-Alloy	5.91×10^{-19} (3.69)	100

기재되어 있으며, 절연재료의 표면에 도전성의 경로가 발생하고 진전하는 형태를 말하며, 건조한 상태에서도 도전성을 갖는다. 트랙킹은 외피 고무와 FRP 코어의 접착이 충분하지 않는 경우, FRP 측의 계면에서도 발생할 수 있다.

트랙킹은 탄소가 매우 적은 상태에서 아크방전 등이 수반된 경우에 발생하기 쉽다.

(2) erosion

위와 같은 정의에 의하면 절연재료의 표면에 도전성이 없는 침식이 발생하는 상태를 말한다. 그 침식은 전표면을 덮는 경우와 국부적으로 집중하여 발생하는 경우 외에 방사상으로 발생하는 경우 등 다양하다.

erosion은 탄소가 존재하는 상태에서 dry-band arc 등에 의해 일어나는 경우가 많다.

(3) Crack

크랙은 자외선에 의한 표면이 비교적 작아서 열은 크랙과 코로나 방전에 의한 크랙이 있다. 전자는 앞에서 서술한 바와 같이 자외선의 에너지보다 결합에너지

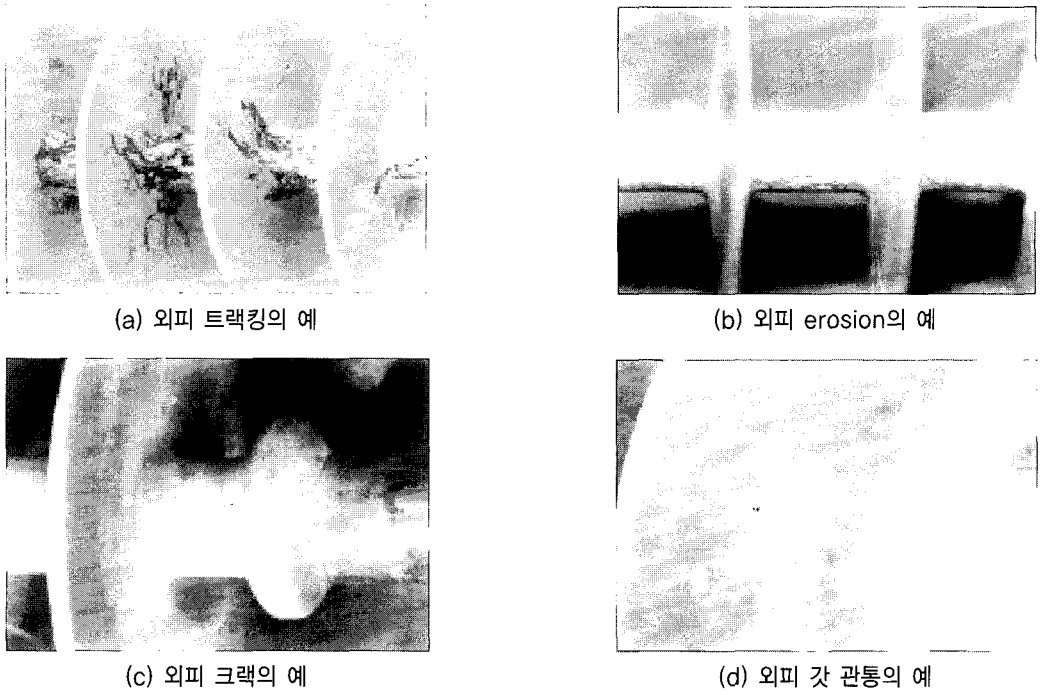


그림 5. 고분자 애자의 열화 형태.

지가 작은 EPDM, EP-Alloy의 -(C-C)-결합의 절단 등으로 인해 발생한다. 후자는 코로나 방전과 습기로 인해 생성된 초산이 충전제와 반응하여 초산화합물을 만들며, 결과적으로 충전제를 고무에서 유출시켜 발생시키는 것이다.

(4) 갓 관통(Shed puncture)

갓 부분에 관통 구멍이 있는 현상을 말한다. 트랙킹이나 erosion의 진전에 의한 갓 관통에 이르는 경우와 흡수, 흡습에 의해서 절연내력이 저하되어 관통에 이르는 경우가 있다

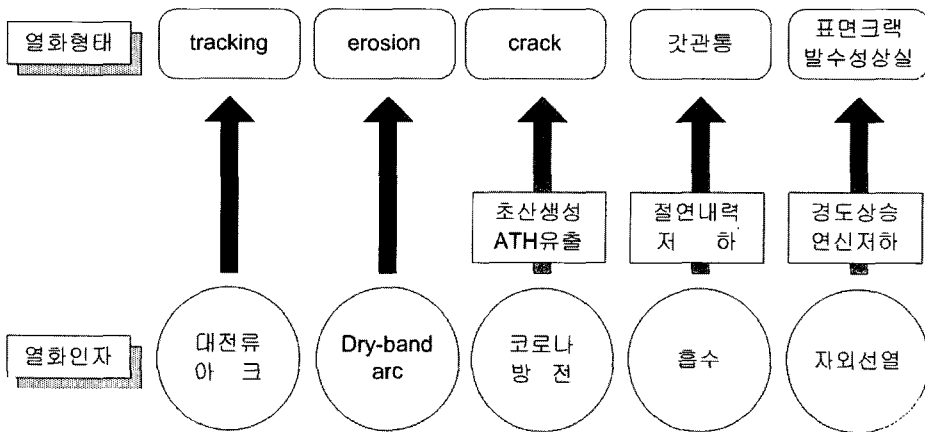


그림 6. 고분자 애자 외피재의 열화형태와 인자.

4.3.2 열화인자

4.3.1에서 서술한 열화형태와 열화를 일으키는 인자를 그림 6에 정리하였다. 일반적으로 옥외에서 일광에 노출된 용도에 사용되는 고무재료에 대해서도 흡수, 자외선에 대한 내성은 요구되지만, 전기절연용도에 있어서는 대전류 아크, dry band arc, 코로나 방전이라고 한 방전현상과 그것으로부터 발생하는 열, 산 등에 대한 특성이 중요하게 됨을 알 수 있다.

5. 결론

지금 까지 현재 철도에 사용되는 고분자 애자의 종류, 열화인자, 열화형태 등에 대해서 서술하였다. 현재 전차선로에 고분자 애자가 많이 채용이 되고 있는 추세이며 현장에서도 좋은 특성을 나타내고 있다. 그러나 장기적인 신뢰성에 대해서는 외국에서도 연구를 하고 있는 추세이다. 설치된 고분자 애자의 열화상태를 진단·감시하는 기술이 연구되어야 할 것으로 판단된다. 제조사에 있어서도 고분자 애자를 제조하는 데 있어서 불량 발생하지 않도록 해야 할 것이며 이동 및 설치 중에도 주의를 해야 할 것이다.

참고 문헌

[1] Masafumi Mase, Kiyoshi Isogawa, Yasuo Sugawara, Daisuke Hanawa, “日立化成テクニカルレポート” No. 42, 2004.
 [2] 김양수, 유해출, “전기철도 구조물 공학”, p. 223, 2002.
 [3] Nagayosi Yuji, “ポリマー碍子”, 電氣鉄道の要素技術
 [4] LG전선주식회사, “고속전차선 시스템 개발-1차년도 보고서”, 1997

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 장동욱

◆ 학력

- 1998년 충북대 전기공학과 공학사
- 2000년 충북대 대학원 전기공학과 공학석사

◆ 경력

- 2000년 - 현재 한국철도기술연구원 전기·신호연구본부 주임연구원

성명 : 박현준

◆ 학력

- 1981년 홍익대 전기공학과 공학사
- 1983년 홍익대 대학원 전기공학과 공학석사
- 2004년 홍익대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1986년 - 1991년 삼성전기(주)정밀기기연구실 과장
- 1992년 - 1996년 현대중공업(주)중앙연구소 책임연구원
- 1997년 - 현재 한국철도기술연구원 전기·신호연구본부 본부장

성명 : 최종선

◆ 학력

- 1983년 서울대 금속공학과 공학사
- 1985년 Ohi State Univ. 전기공학과 공학석사
- 1987년 Purdue Univ. 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1994년 - 현재 홍익대 전기정보제어공학과 교수

성명 : 김정수

◆ 학력

- 1960년 연세대 전기공학과 졸업
- 1974년 홍익대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1985년 홍익대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1985년 - 현재 홍익대 전기정보제어공학과 명예교수