

# 전차선로 순환전류 발생원인과 대책에 관한 연구

## A Study on Causes and Measures Against Occurrence of Circulating Current in catenary

한학수\*

민경윤\*\*

Han, Hag-Su

Min, Kyung-Yun

---

### ABSTRACT

Electric car tract plays the role of supply high electric power to the electric car from the substation by using Pantograph of the electric car. It is always exposed to the external atmosphere, which results in quite substantial fluctuations in current and voltage during operation of electric car. This generates possibility of occurrence of accident at all times.

Since range of wiring metallic globe installed on the catenary cannot achieve complete electrical contact, accidents are occurring due to circulating current caused by arc caused by incomplete contact due to occurrence of hairline fracture of Pantograph due to pressure or vibration of wiring. Furthermore, rapid increase in the operational current due to increase in the operational frequency of the electric car is causing erosion and short circuit of the metallic globe at the contact points.

This study on arc is generated as current transmitted out of the substation courses through power line or wiring metallic globe other than the main circuit as the current is being collected at the electric car through feeder and feeder divergence device.

Accordingly, since heat generated by the arc becomes the cause for generation of circulating current due to melting of metal or softening of metal due to increase in temperature accompanying increase in contact resistance, this research shall describe causes and measures against occurrence of circulation current.

---

### 1. 서 론

전차선로는 전동차의 팬터그래프를 이용하여 변전소로부터 높은 전력을 전동차에 공급하는 역할을 하며, 항상 외부 대기 중에 노출되어 있고 전동차 운행에 따른 전류와 전압변동이 커서 사고가 발생할 가능성이 항상 존재한다.

전차선로에 시설되어있는 가선 금구류는 전기적으로 완전한 접속이 이루어지지 않으므로써 팬터그래프의 압상 또는 가선진동으로 불완전 접속에 의한 아크가 발생하여 순환전류에 의한 사고가 발생하고 있고, 전동차 운행 빈도의 증가에 따른 운전전류의 급증으로 인한 접속개소에서 금구류의 용손 및 단락이 되는 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 변전소로부터 송출된 전류가 급전선, 급전분기 장치 등을 통하여 전동차에 집전되기까지의 사이에 주회로 이외의 전선, 가선 금구 등에 흘러 아크가 발생하고, 아크열에 따라 금속의 용해 또는 접촉저항의 증대로 수반되는 온도 상승에 의해 금속의 연화 등 순환전류의 발생 원인이 되므로 순환전류의 발생원인과 대책에 관하여 기술하고자 한다.

---

\* 서울메트로, 기술연구센터, 정회원

E-mail : hagsu@seoulmetro.co.kr

TEL : (02)520-5964 FAX : (02)520-5969

\*\* 서울메트로, 기술연구센터, 팀장, 정회원

## 2. 본 론

### 2.1 순환전류(Circulating Current)

#### 2.1.1 순환전류(Circulating Current)의 개요

변전소로부터 송출된 전류가 급전선, 급전분기장치 등을 통하여 전동차에 집전되기까지의 사이에 주 회로(전차선) 이외의 전선, 가선금구 등에 흐르는 전류를 말한다.

#### 2.1.2 순환전류의 경로

- 가. 변전소로부터 급전선, 급전분기선, 전차선을 통하여 전동차(부하)에 전기를 공급하는 경로(전차선로)는 복수의 전선과 전선을 지지하는 금구 등의 부재도 도체로 구성되어 있기 때문에 실제 전차선로의 전류회로는 아주 복잡한 전류회로로 구성되어 있다.
- 나. 순환전류가 흐르는 경로는 조가선, 행거, 균압선, 곡선당김, 진지장치, 교차개소 등에서 불완전 접촉개소 등을 통하여 흐르기 때문에 진동 또는 기타의 원인에 의하여 회로구성이 불완전하게 되어 아크가 발생하게 되고, 전선이나 부속금구가 전식 또는 용해되거나 접촉저항의 증가로 인한 온도상승으로 연화되어 시설물 장애를 유발할 위험을 가지고 있다.

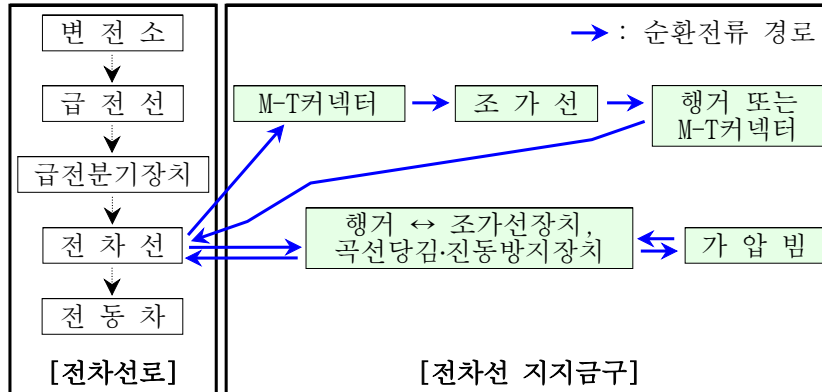


그림 1. 순환전류의 경로

#### 2.1.3 순환전류 발생원인

순환전류는 카테나리 가선방식에서 조가선, 행거 또는 드로퍼, 균압선, 곡선당김장치, 교차개소 등 불완전 접촉개소에서 전동차 또는 바람 등에 의해 접촉부의 분리 및 접촉이 반복될 때 Arc열에 의해 접촉저항이 증가하고 이에 따른 온도상승으로 금속이 용해되거나 경화되어 단선에 이르게 되고, 이중 금속의 접촉시에도 부식으로 인하여 순환전류가 발생하게 된다.

#### 2.1.4 순환전류 사고유형

- 가. 부식 및 접촉 불량 등에 의한 접촉저항 증가로 접촉점에서 전동차가 통과 중 과도한 전류가 흘러 단선되고, 전동차 통과 중에 진동 또는 바람에 의한 가선의 흔들림으로 인해 가선 및 금구간의 반복적인 접촉으로 용손 되어 단선된다.
- 나. 교차개소 등은 전차선로가 복잡한 전류분포를 이루게 되어 전동차 통과 중에 전류가 한곳에 편중되어 흘러 단선에 이르게 되고, 접촉점의 불완전 접촉시 가선진동으로 가선이 서로 접촉하여 Arc가 발생되어 용손 된다.

## 2.2 현 실태 및 문제점

- 가. 전동차의 대수가 증가하고, 이용승객이 증가되어 전동차의 운행간격이 축소됨에 따라 부하전류가 증가하게 되어 전차선로에서는 순환전류에 의한 문제점이 발생하게 되고, 전동차의 운전에 의해 부하점이 이동하여 급격한 부하변동을 수반하고 있다.

- 나. 전차선로는 높은 전압과 전류를 변전소로부터 전동차의 팬터그래프를 이용하여 전동차에 공급하는 매개 역할을 하며, 항상 외부 대기 중에 노출되어 있고 전동차 운행에 따른 전류와 전압변동률이 커서 사고가 발생할 가능성이 항상 존재하고 있다.
- 다. 조가선과 전차선의 지지점이 전기적으로 완전한 접속이 이루어지지 않아 팬터그래프의 압상 또는 가선진동으로 불완전 접촉에 의한 아크가 발생하여 용손 및 단선사고 등 순환전류 사고가 발생하며, 전차선은 외기온도 및 일사, 전차선 자체의 부하전류에 의한 저항손과 팬터그래프와의 접촉에 의한 저항손이 발생하여 접속지점 등에서 접촉저항 증가로 인한 전차선의 온도가 상승하는 문제점이 발생한다. 또한, 전차선로는 선로의 일부이므로 터널, 교량, 역사 등 구조물에 의한 설비상의 제한을 받는다.

### 2.3 순환전류 방지 방안 검토

순환전류를 방지하기 위해 균압방식과 절연방식을 주로 사용하고 있다. 균압방식은 각 전선 및 가선 금구 상호를 저 저항으로 완전하게 접속하여 전위차를 작게 함과 동시에 완전한 전류 회로가 되게 구성하는 것이고, 절연방식은 순환전류에 따른 조가선, 행거 등이 손상하지 않도록 충분한 거리를 두거나 전기적으로 절연하는 것이다.

#### 2.3.1 전차선로 구조개선

##### 가. 교차장치개소

- 조가선 상호, 전차선 상호 및 조가선과 전차선을 동일개소에서 커넥터로 완전하게 접속한다.
- M-M커넥터, T-T커넥터(Feed Ear)를 각각 설치하고 무효부에서는 조가선과 전차선을 M-T커넥터로 접속한다.

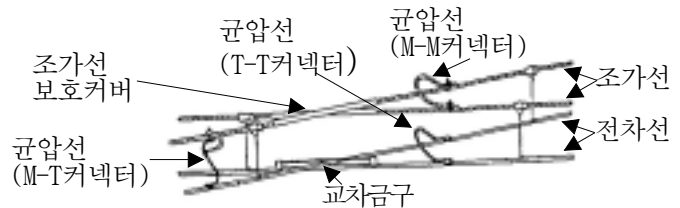


그림 2. 교차장치 개소

##### 나. 전차선 교차개소

- 각 전차선 상호 및 전차선과 행거 등 가선금구가 접촉되지 않도록 충분한 거리(300mm 초과하도록 시설)를 확보(각 전선 상호의 이격이 300mm를 초과할 때는 방호 불필요)하고, 충분한 이격이 확보되지 않는 경우는 전선 상호간을 보호관으로 절연하며, 보호관이 팬터그래프의 통과에 지장을 줄 우려가 있는 경우 등 절연을 하는 것이 적절하지 않은 경우는 조가선 상호(M-M) 및 전차선 상호(T-T)간을 접속한다.
- 지지점 아래 및 그 근방의 전선 상호의 접촉이 없는 개소는 보호관을 취부하지 않아도 되며, 보호관은 빗물 등으로 인한 보호관 내부의 조가선 부식을 방지하기 위해 통기성이 좋고, 조가선의 부식을 촉진시킬 우려가 없는 배수형의 것을 사용하여 직접 전선에 취부 한다.
- 일반적으로 300mm를 넘는 이격 거리를 확보할 수 없는 경우는 교류 구간에서는 균압방식을 사용하고, 직류 구간에서는 절연방식을 사용한다.



그림 3. 전차선 교차개소

다. Air Joint 개소

Air Joint 개소 평행 부분의 조가선 상호 및 전차선과 조가선을 커넥터(T-M-M-T)로 일괄접속하고, 커넥터를 기계적 구분개소에서 멀리 떨어진 장소에서 접속하면 전기적인 효과를 기대하기 어려우므로 각 전선 상호간의 접속을 동일 개소에서 시행한다.

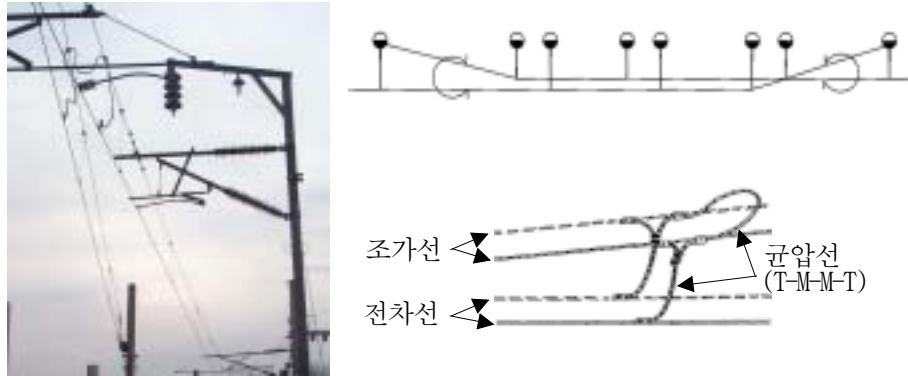


그림 4. Air Joint 개소

라. 무효인류개소

인류개소로부터 2경간 이내에 조가선과 전차선을 커넥터(M-T)로 접속(2경간 이내에 조가선과 전차선의 접속이 있는 경우 생략)하고, 교차장치개소 등에서 인류개소까지 거리가 멀고 여러 경간에 걸치는 경우는 요크로 일괄 접속하여 교차개소의 단순화를 도모한다.



그림 5. 무효인류개소

마. 가압 빔 및 빔 하 스패션 개소

가압 빔 및 빔 하 스패션의 각 지지점은 조가선 및 전차선을 전기적으로 완전하게 접속하고, 전류가 많이 흐르는 변전소 부근에서는 필요에 따라 애자 등으로 절연한다.

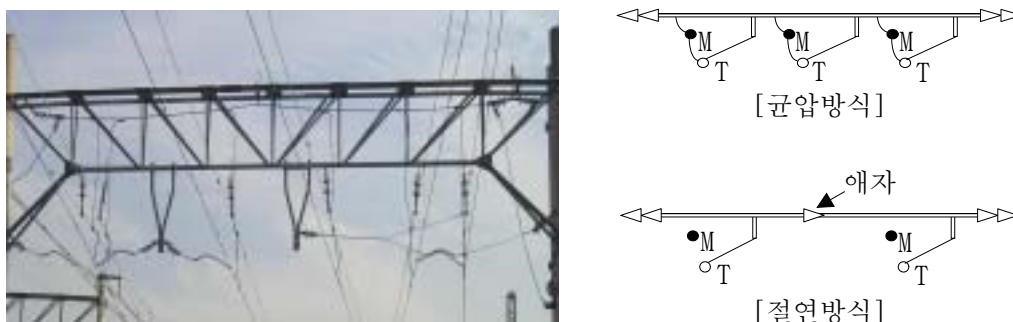


그림 6. 가압 빔 및 빔 하 스패션 개소

바. 급전분기개소

○ 조가선과 급전분기개소는 접속하고, 접속하는 것이 적당하지 않을 때에는 조가선과 전차선을 접속하며, 필요에 따라 가동브라켓의 진동방지파이프와 곡선당김금구 등을 접속한다.

- 조가선과 급전분기장치를 지지접속하고, 급전분기리드선과 가동브라켓이 접촉하지 않도록 이격 또는 절연한다.
- 조가선과 급전분기선의 접속이 어려울 경우에는 전차선과 급전분기선을 접속하고 조가선과 전차선을 접속하기 위한 균압선(M-T커넥터)을 급전분기선과 가동브라켓이 접촉하지 않도록 급전분기장치 근처에 설치한다.
- 급전분기선의 절연  
급전분기선을 절연체로 사용하여 가동브라켓과 급전분기선간에 접촉하지 않도록 절연한다.
- 급전분기선 지지금구 절연  
급전분기선을 가동브라켓에 고정시켜주는 U-볼트의 급전분기선 지지금구 사이에 절연재를 삽입, 개량하여 가동브라켓과 급전분기선간 접촉하지 않도록 절연한다.

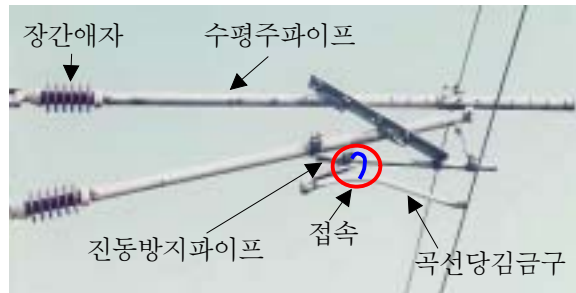
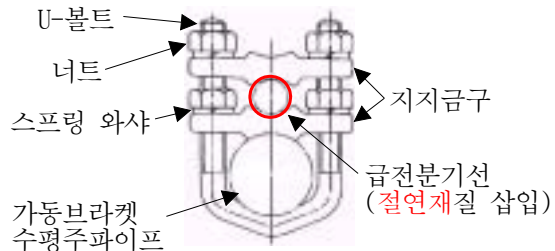
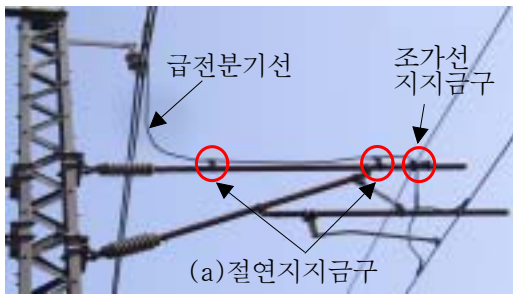


그림 7. 진동방지파이프와 곡선당김금구 접속



(a)급전분기선 지지금구

그림 8. 가동브라켓과 급전분기선, 조가선 접속



그림 9. 조가선과 급전분기선 접속

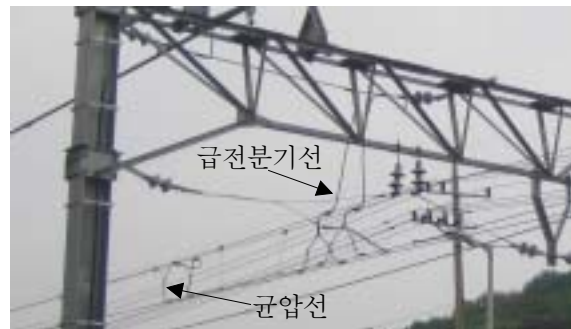


그림 10. 전차선과 급전분기선 접속, M-T균압

사. 기타(조가선과 전차선과의 접속)

- 조가선과 전차선의 접속은 조가선에 카드뮴동연선 등의 전선을 사용했을 때 조가선에서 분류한 전류가 행거를 매개체로 전차선에 흐르면 조가선의 소선 단선의 원인이 되므로 균압선을 설치한다.
- 조가선과 전차선의 사이는 균압선(M-T커넥터)에 의해 접속하고, 운전 전류가 큰 구간은 균압 구간을 1/2이하로 단축하며, 터널 입출고 및 과선교 양쪽에는 M-T 균압선을 설치한다. 또한 125m

마다 M-T 균압선을 설치하고, 전동차가 상시 정차, 출발하는 곳에는 균압선을 설치한다.

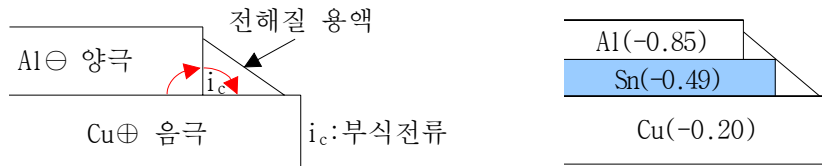
### 2.3.2 이종금속 접촉부식 방지

두 종류의 금속이 접촉하고 있는 개소가 염분 등 전해질의 용액에 접촉하면 그곳에 국부전지가 형성되어, 그 용액 중의 금속 전극 전위에 의하여 생성된 마이너스(-) 전위가 높은 금속이 양극으로 되어 용액 중에서 용해되어 부식된다. 접촉 부식에 의한 부식량은 그 경우의 부식 전류량과 비례 관계가 있고, 그것은 전극의 전위차에 기인하고, 전극 전위차가 큰 금속, 즉 전위열에서 금속 상호간에 서로 떨어져 있는 정도가 큰 것이 접촉 부식이 심하게 된다.

※ 상대전위차(2개의 금속 전위의 상대차로부터 부식의 정도를 알아내는 식)

$$2(V_a - V_b) / (V_a + V_b) \quad (V_a : a\text{금속의 전위}, V_b : b\text{금속의 전위})$$

참고로 알루미늄과 동이 조합된 알루미늄의 부식량은 철과 동이 조합된 경우의 철의 부식량 보다 크게 된다. 또, 알루미늄과 동의 슬리브에서 중간 금속으로 주석 합금을 사용하고 있으나, 주석은 알루미늄과 동의 중간의 전위가 되기 때문에 이것이 게재된 것에는 각각의 전위차가 적어 부식이 경감된다. 실제로는 각종 금속체는 표면에 산화 피막이 형성된다든지, 표면이 부식으로 생성된 생성물로 피막되어 있다든지 하는 복잡한 현상을 나타내고 있는 경우가 많아, 꼭 전위차에 비례하지는 않지만 원칙적으로는 이와 같은 경향이 나타난다.



※ Al과 Cu의 접촉면에 Sn합금(도금) 사용으로 부식경감

그림 11. 국부전지 작용

#### 가. 이종금속의 접촉 부식 원인

- 이종금속의 접촉 부식은 전지작용(일종의 전기분해 작용)이기 때문에 수분이 없으면 절대 부식은 발생하지 않지만, 대기 중에 노출되어 있으므로 수분의 부착이나 온도에 의한 영향을 받고, 부착 수분의 성질(해안지구의 염수, 공해지대의 아황산 수) 등에 따라 물의 도전성이 높게 되고, 그 농도에 따라 부식은 상당히 빨리 진행되며, 온도가 높으면 부식이 빨라(20℃가 넘으면 2배가 빠르다)지므로 연간 온도가 높은 장소, 전류 등에 의해 온도가 상승하는 개소는 주의하여야 한다.
- 분진이 부착되면 습기를 먹고, 분진의 성분이 습기에 녹아 영향을 주므로 분진의 부착에 주의하여야 한다.
- 2종류 금속이 결합될시 각 금속은 각각 고유의 이온화 경향을 가지고 있으며, 이온화 경향이 큰 금속일수록 부식하기 쉽고, 2종류의 금속이 결합되는 경우 양자의 이온화 경향의 차가 작을수록 부식의 정도는 작아진다.

#### 나. 이종금속의 접촉에 의한 부식 방지 방법

- 이종금속 접촉 부위에 수분이 없으면 부식이 발생하지 않으므로 이종금속간에 물이 고이지 않는 구조로 하고, 국부전지의 전류를 차단하면 부식이 방지되므로 이종금속간을 절연하고, 중간금속을 삽입하는 것으로 이종금속 상호의 전위차를 줄여 부식을 감소할 수 있으므로 이종금속간에 중간금속을 삽입한다.

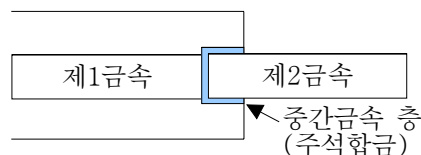


그림 12. 중간금속 층의 삽입

- 접촉 부식에 의한 부식량은 부식 전류밀도에 비례하므로, 양극 금속의 표면을 음극 금속에 비교하여 크게 하고 양극의 전류밀도를 줄이는 것으로 부식을 감소할 수 있으므로 접촉 면적을 적게 하며, 전극전위가 근접한 것을 선택한다.

표 1. 이종금속의 접촉에 의한 부식 정도

접촉금속 피접촉금속	금 은	Al 청동 은로우	동 황동	니켈	납 주석	철강 주철	카드뮴	아연	스테인리스강	크롬	Al
금, 은	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Al 청동, 은로우	C	-	A	A	A	A	A	A	B	B	A
동, 황동	C	B	-	B	B	A	A	A	B	B	A
니켈	C	A	A	-	A	A	A	A	B	B	A
납, 주석	C	B	B	B	-	A	A	A	B	B	A
철강, 주철	C	C	C	C	C	-	A	A	C	C	B
카드뮴	C	C	C	C	B	C	-	A	C	C	B
아연	C	C	C	C	B	C	B	-	C	C	C
스테인리스강	A	A	A	A	A	A	A	A	-	A	A
크롬	A	A	A	A	A	A	A	A	A	-	A
Al	C	C	C	C	B	B	A	A	B	B	-

※ 2개의 금속 접촉에는 전위가 낮은 측(표의 상방향의 것)이 항상 부식되는 측이고, 전위가 높은 측(표의 하방향의 것)은 거의 부식하지 않음

- A : 접촉 금속에 의한 피접촉 금구의 부식이 증가하지 않는 것
- B : 접촉 금속에 의한 피접촉 금구의 부식이 약간 증가하는 것
- C : 접촉 금속에 의한 피접촉 금구의 부식이 심하게 증가하는 것
- D : 조합을 금하여야 할 것

다. 이종금속 부식방지 기본대책

- 설계시 부식 환경에 전위차가 작은 이종금속을 선택하고, 도장을 하는 경우 Anode 금속은 피복을 피하고, Cathode 금속은 피복하고, 그렇지 않으면 양 금속을 피복하여 부식을 방지한다.
- 전차선과 조가선이 연결되는 모든 금구사이에 절연물(절연성 FRP, 애자 등)을 삽입하고, 사용 환경에 Grease 같은 부식 방지 막 이나 차단물(중간금속)을 삽입하여 부식을 방지한다.
- 이종금속 방지대책을 충분히 검토하여 도입하면 알루미늄 재질 금구를 보다 적극적으로 사용할 수 있고, 이에 따른 전차선로의 경량화에 의한 주행속도 향상은 물론 지지금구의 도전율이 보다 좋아짐에 따라 순환전류 사고 방지에도 크게 도움이 된다.

3. 결 론

순환전류의 사고는 전선, 가선금구, 또는 이들 상호간에 진동이나 바람 등에 의한 가선진동에 의해 접촉부의 접촉이 반복될 때 불완전 접촉상태에 있게 되어 Arc 열에 의한 접촉저항 증대로 온도가 상승하여 금속이 용해 및 연화되어 일어나게 되므로, 주요 금구에 흐르는 전류 및 전압분포의 실태를 정확히 파악하여 전기회로 구성상에 순환전류에 의한 조가선과 행거 등이 손상 받지 않도록 충분한 이격을 유지하기 위한 전기적인 절연을 하거나, 저 저항으로 완전한 접촉을 하여야겠다.

또한 전차선로의 구조를 개선하고, 이종금속간 전위차에 의한 부식을 방지하여야 하며, 작업의 효율화를 위해 금구의 합리화를 추구하여 적절한 금구의 개발과 점차적인 교체를 수행하고, 급전구간별 전류

분포도를 주기적으로 예측하고 측정하여 전차선로 성능변화에 신속히 대응할 수 있는 전산화를 구축하면 순환전류 사고 예방 및 전차선로의 수명을 예측하는데 크게 도움이 될 것이다.

## 참고문헌

1. 일본철도전기기술협회(1995), “전차선”
2. 일본철도전기기술협회(1995), “전차선장치”
3. 양병남(2004), “전기철도공학”, 성안당
4. 안영훈, “프랑스 고속철도 전차선로 시스템에서 균압선의 문제점”
5. 한국철도기술연구원(1995), “전차선로 순환전류 발생원인과 대책에 관한 연구”
5. (주)대동기술단(2001), “전차선로 순환전류 사고방지를 위한 드로퍼 개선방안”
6. 김종희(2003), “전차선로 순환전류 발생원인과 대책에 관한 연구”, 석사논문, 연세대학교
7. 김용기, 장세기, 조성일(2002), “가선재의 기계적 특성에 미치는 부식 환경의 영향”, 한국철도학회 논문집(제5권 제1호)
8. 김용기, 장세기, 조성일, 이재봉(2001), “전차선로 가선재의 수용액 부식특성”, 한국철도학회 논문집(제4권 제2호)