ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 10, pp. 1470~1474, 2013
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.10.1470

# 자동운전 도시철도차량의 운전특성을 고려한 절연구분장치 이론적 고찰

# Theoretical Study of Neutral Section Considering the Driving Characteristics of ATO Urban Railway Vehicle

이 재 봉* · 김 재 문†
(Jae-Bong Lee · Jae-Moon Kim)

**Abstract** - In this paper, proper length of neutral section and neutral section system configuration is proposed to minimize accidents if ATO urban railway vehicle stops maintaining the leading vehicles in air section at regular intervals. When considering the minimum voltage sensing of power conversion unit in the urban railway vehicle, the effective length of 14,280[mm] with neutral section can be minimized damage due to high current because the urban railway vehicle is very little present chance compare neutral section with pantograph interval installed on a unit vehicle. In addition, uplift of catenary line and contact wire consider to minimize damage. The result of theoretical review, as the proposed neutral section shorter, isolated neutral section is effective than the integrated neutral section

**Key Words** : ATO urban railway vehicle, Neutral section, Pantograph, Contact wire

## 1. 서 론

최근 국내 철도분야는 화석연료 고갈과 온실가스 저감대책 등의 일환으로 정부에서 추진하고 있는 에너지 시책에 따라 기존에 운행되고 있던 디젤차량에서 전기차량으로 전환되고 있다. 또한 전기차량의 운행확대를 위해 지자체에서 운행하고 있는 구간인 경우 전철화가 되어 있으며, 광역철도인 코레일 운행구간에서도 전철화가 지속적으로 이루어지고 있다.

전기를 에너지원으로 사용하는 전기철도의 전차선로는 차량에 전기에너지를 전달하는 매체로 고속철도, 일반철도 및 도시철도에 널리 적용되고 있다. 이러한 전차선로는 철도시스템에만 사용되는 구조로 다양한 구조의 전차선로 방식이 있으며 철도차량 상부에 설치된 팬터그래프와 직접 접촉하여 차량에 전기에너지를 전달하는데 이를 집전이라고 한다. 전기철도의 집전 성능은 팬터그래프와 전차선간의 다양한 상호작용에 의해 기계적 관점과 전기적 관점에서 성능을 나눌 수 있다. 팬터그래프와 전차선간의 집전성능의 이상으로 인해 전차선의 마모, 온도상승, 피로파단 등 다양한 형태의 성능저하가 나타날 수 있으며 팬터그래프의 경우 집전판의 마모 등이 나타날 수 있다[1].

한편 전차선로는 전기차량이 운행하는 넓은 범위에 전기를 공급하게 되는데, 한전 계통을 통해 공급받는 전압은 전철변전소에서 가공하여 전기차량에 공급하고 있다. 그러나 전차선로의 전압강하로 인해 일정구간마다 전철변전소를 두어 전기를 공급하고 있는데, 직류구간인 경우 1,500[V] 교류구간인 경우 25,000[V]이다. 따라서 한 개의 노선을 운행하는 전기차량인 경우 수시로 직류-직류구간, 직류-교류구간, 교류-교류구간을 지나게 되는데 이때 타행(Coasting operation)으로 운행하는 사구간(Dead Section)이 존재하게 되며 이 구간에 절연구분장치를 두게 된다.

전기 철도차량이 자동운전으로 선행 전기차량과 간격조정으로 불가피하게 절연구분장치(Air Section) 구간에 정차하게 되는 경우가 발생하게 된다. 이때 절연구분장치를 구성하는 전차선 상호간에 집전장치인 팬터그래프가 접촉되면 심한 경우 전위차로 인한 전차선의 용융 절손이 발생할 수 있다[2][3].

본 논문에서는 전차선 특성에 따른 용손되는 경우를 고찰하고 용손 방지를 위해 전기차량 운전속도와 1개 Unit당 집전장치의 간격 등을 고려한 개선된 절연구분장치를 제안하였다. 이를 통해 절연구분장치 구간에 전차선 단선을 최소화할 수 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 전차선 특성

전차선은 전압이 인가된 활선상태에서 주행하는 전기차량 상부의 팬터그래프와 직접 접촉하여 전류를 전기차량으로 공급하는 매체 역할을 한다. 따라서 팬터그래프의 습동에 따라 기계적으로 마모하기 때문에 전기를 공급하는 유효 단면적은 점진적으로 감소하고 전차선의 항장력이 저하되기 때문에 단선될 우려가 있다. 표 1은 도시철도구간에 적용되고 있는 Cu 170[mm$^2$] 전차선의 특성을 보여준다[4].

* Dept. of Electric Communication, Seoul Metro, Korea
† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr
Received : August 23, 2013; Accepted : September 25, 2013

**표 1** 전차선의 특성
**Table 1** The Characteristics of contact line

| 항 목 | | 경동선 |
|---|---|---|
| 물리적 특 성 | 융점[℃] | 1083 |
| | 용해착열[cal/g] | 50.3 |
| | 비열(20[℃], [cal/g/℃]) | 0.093 |
| | 열전도율([cal/cm], [sec], [℃]) | 0.92 |
| | 비중(20[℃]) | 8.89 |
| | 선팽창 계수(20[℃], [/℃]) | $17\times10^{-6}$ |
| 기계적 전기적 특 성 | 인장 강도[kgf/mm$^2$] | 41.6~44.9 |
| | 신축(伸縮)[%] | 0.6~2.0 |
| | 항복점(0.2[%], [kgf/mm$^2$]) | 35~42 |
| | 탄성 한도(0.01[%], [kgf/mm$^2$] | 17.5~31.5 |
| | 탄성 계수[kgf/mm$^2$] | 약 12000 |
| | 피로 한도(107[[kgf/mm$^2$]) | 11.5~12.5 |
| | 도전율[%] | 97 |
| | 저항 온도 계수(20[℃], [/℃]) | 0.00381 |

**표 2** 전차선 마모에 따른 특성 변화
**Table 2** The characteristic variation with wear of contact line

| 잔존지름[㎜] | 잔존면적[㎟] | 항장력[kgf] | 저항[Ω/km] |
|---|---|---|---|
| 15.49 | 170.00 | 5900.0 | 0.1040 |
| 15.00 | 168.22 | 5838.2 | 0.1051 |
| 14.00 | 160.74 | 5578.6 | 0.1100 |
| 13.00 | 150.41 | 5220.1 | 0.1175 |
| 12.00 | 138.20 | 4796.4 | 0.1279 |
| 11.00 | 124.67 | 4326.8 | 0.1418 |
| 10.00 | 110.21 | 3824.9 | 0.1604 |
| 9.00 | 95.13 | 3301.6 | 0.1859 |
| 8.50(마모한계) | 87.45 | 3135.0 | 0.2022 |
| 8.00 | 79.72 | 2766.8 | 0.2218 |

전차선의 전기적 마모는 팬터그래프와 전차선의 불완전 접촉 또는 주행 중에 발생하는 이선 등에 의해 기인하는 아크의 전기적 요인에 따른다. 전차선의 구배 변화점, 경점 개소, 장력 부적정 개소, 습동면의 요철이 주 요인이 된다. 일반적으로 교류전원 구간은 직류구간에 비해 인가전압이 높아 상대적으로 전차선에 흐르는 전류가 작아 전기적 마모보다 기계적인 마모가 크다. 반면 직류전원 구간은 교류구간에 비해 전차선 인가전압이 낮아 대전류가 흐르므로 기계적인 마모보다 전기적인 마모가 크게 나타난다. 표 2는 전차선 마모에 대한 특성변화를 보여준다. 전차선 굵기가 작을수록 항장력이 작아지고 단위 길이당 저항이 커짐을 알 수 있다.

### 2.2 전차선에 흐르는 전류가 전차선에 미치는 영향

일반적으로 도체에 전류가 흐르면 도체내의 저항으로 인해 열이 발생하는데 이때 저항에 의해 발생한 열량을 주울열이라고 한다. 식 1에서 보듯이 전류에 의해 생기는 열량 Q[J]은 전류 $i$[A]의 제곱, 도체 저항 R[Ω], 전류를 통과하는 시간 $t$[sec]에 비례한다.

$$Q = i^2Rt \ [\mathrm{J}] \tag{1}$$

전차선 온도는 전류의 정상적인 전로와 비정상적인 전로에 관계없이 적용 되므로 전차선에 흐르는 전류가 증가하게 되면 2차 함수 곡선으로 나타난다. 예를 들어 아래와 같이 가정하면, 그림 1에 보듯이 전차선에 흐르는 전류와 온도의 상관관계를 추이곡선으로 나타낸다.

- 단방향 차단기 투입 지속 시간 : 35초
- 전차선 저항 : 0.1279[Ω/km]

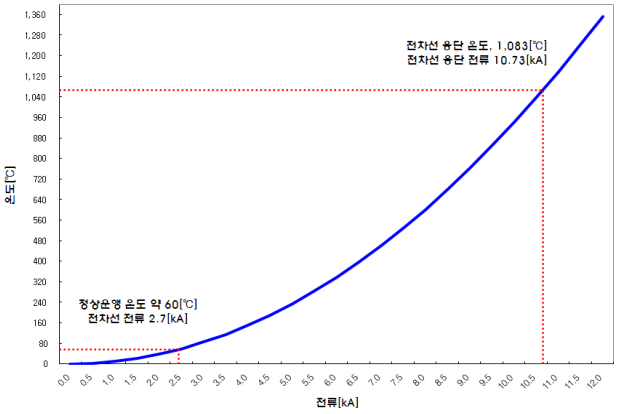



**그림 1** 전차선 전류에 따른 온도 특성곡선
**Fig. 1** The characteristic curve of temperature according to contact line current

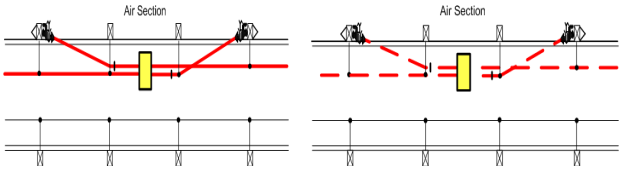
전차선에 흐르는 전류가 2,700[A]인 경우, 전차선 온도는 60[℃]가 되고, 지속적으로 전차선에 전류가 증가하여 10.73[kA]가 되면 표 1에 보듯이 전차선 용융점인 1,083[℃]에 도달하여 단선된다. 뿐만 아니라 전차선에 흐르는 전류가 5,000[A]인 경우 전차선 온도는 235℃가 되어 온도가 상승함에 따라 산화피막 생성이 촉진된다. 집전전류가 작을 때 산화피막의 존재는 전차선의 마모에 보호효과(일종의 윤활효과)가 있지만 집전전류가 크면 전기접촉 불량에 따라 아크가 발생하기 쉽게 되고 마모 증대의 원인이 된다.

#### 2.2.1 절연구분장치 구간 내 철도차량이 존재하는 경우

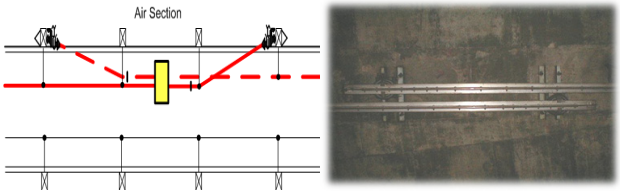
도시철도차량 운행과 관련한 운전취급규정 제300조에 따르면, 기관사는 부득이한 사유로 정차할 경우 팬터그래프가 전차선 구분장치에 걸치지 않도록 해야 한다. 그림 2는 절연구분장치 구간인 에어섹션의 각 경우에 대해 보여준다.

그림 2에서 (a), (b)인 경우 도시철도차량이 운행 중에 절연구분구간인 에어섹션 내에서 정지되어도 문제가 없지만 (c)인 경우 섹션 장소에서 차량이 진입하는 경우 사고전류 또는 부하전류가 집전장치인 팬터그래프를 통과하여 급전하게 되므로 섹션 오버(Section Over)로 인해 전차선의 전력공급이 차단하게 된다.

일반적으로 구분장치 구간을 역행 상태로 진입하게 될 경우 무가압 상태에서 갑자기 가압상태로 이전하게 되면서 스파크가 발생하게 되어 화재 및 장비 손상의 우려가 있기에 타행상태로 통과해야만 하며, 이런 운전상의 이유로 전차선




(a) 급전-급전 (b) 단전-단전




(c) 급전-단전 (d) 에어섹션 사진

**그림 2** 에어섹션 구간 내 철도차량이 존재하는 경우

**Fig. 2** In case of being railway electric vehicle in air section

구분장치 구간에는 구분표지를 설치하여 구간 외 정차하도록 하고 있으며, 절연구간 전(前)에 절연 구간을 예고하여 타행 운전을 하도록 하는 표지와 절연구간을 완전히 벗어난 지점에 재가속이 가능한 지점을 알리는 역행 표지가 설치되어 있다. 그림 3은 에어섹션 구간 내에서 섹션 오버가 발생하였을 때의 전차선 절단면 상태와 도시철도차량 상부의 팬터그래프 소손 상태를 보여준다.

(a) 전차선 절단면 상태 (b) 팬터그래프 소손 상태

**그림 3** 에어섹션 구간 내 전차선, 팬터그래프 소손 상태

**Fig. 3** state of be partially burned contact wire, pantograph in air section

### 2.2.2 에어섹션 내 철도차량 진입에 따른 사고의 경우

직류 1500[V]를 공급받는 도시철도구간인 경우 도시철도차량이 운행하기 위해서는 대전류를 필요로 하므로 이에 따른 전압강하로 인해 그림 4에서 보듯이 일정구간마다 전철변전소(S/S)가 존재한다. 도시철도구간을 운행하는 전동차가 자동열차운전(Auto Train Operation, 이하 ATO), 자동열차정지(Auto Train Stop, 이하 ATS) 등의 기능을 갖춘 다양한 차량이 운행되고 있음을 보여준다. 자동열차운전(ATO) 차량에 대해 각 노선마다 에어섹션 구간 내에서 부득이 차량이 정차시킬 경우 팬터그래프가 자동하강 동작을 하거나 관제에서 지령에 의해 하강하는 등 다양하게 관리되고 있다.

그림 4에서 A 변전소(S/S) 방향으로 일정시격을 두고 도시철도차량이 운행되고 있는 도중에 ATO 기능을 갖는 D 차량이 에어섹션을 지나다가 자동정차하여 존재하게 된다.

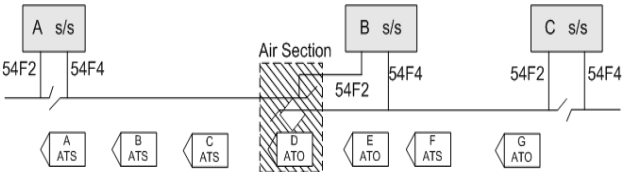



**그림 4** 에어섹션 구간 내 철도차량이 정차되어 있을 경우

**Fig. 4** In case of be stopped railway electric vehicle in air section

정차된 차량들이 역행하면서 큰 부하전류가 흐르고 전철변전소에 구비된 차단기 54F4(A S/S), 54F2 및 54F4(B S/S), 54F2(C S/S)가 갑자기 트립(Trip)되게 된다. 이때 트립되어 있던 차단기들이 순차적으로 54F2(C S/S)→54F2, 54F4(B S/S)→54F4(A S/S)가 투입하는 과정에서 54F4(A S/S)가 투입되지 않고 54F2(B S/S)가 투입되는 순간 D 차량은 역행을 하게 되면 집전장치인 팬터그래프를 통해 연결되어 A, B, C 차량에 대전류를 공급하게 된다. 이때 팬터그래프는 불안전 접촉이 발생하여 전차선 및 팬터그래프가 용손이 된다.

### 2.3 절연구분장치 이론적 고찰

절연구분장치인 에어섹션 구간 내에서의 용손방지를 위해 직류-직류 급전구분장치 길이를 계산하기 위해 이론적 고찰을 하고자 한다. 절연구분장치 길이를 계산하기 위한 조건을 아래와 같이 설정하고 차단기 차단시간은 IEC 61992-2에 준한다.

$$l = t \times v \tag{2}$$

이때 유효길이 $l$[mm], 총동작시간 $t$[h], 운전속도 $v$[km/h], 아크 지속시간 40[ms], 전압계전기 동작시간 100[ms], 차단기 차단시간 20[ms], 여유시간 50[ms]

식 2에서 총 동작시간은 210[ms]가 되어 도시철도설계 속도인 차량 운전속도 80[km/h]로 하면 적정 유효길이는 16,800[mm]가 된다.

한편 운전속도 80[km/h]로 도시철도차량이 주행할 때 절연 구분 장치에서 전차선으로부터 집전된 전원을 공기조화장치 및 제어장치 등 보조전원을 필요로 하는 각종 기기에 안정된 전원을 공급하도록 하는 차량 보조전원장치(SIV) 저전압감지 최소시간을 고려하여 무가압 시간을 단축하기 위해 급전구분시스템 최소길이 14,280[mm]로 하고 그림 5의 팬터그래프 간격을 적용하면 식 3에서 무가압 여유길이를 구할 수 있다.

$$l_s = l_{\min} - l_{pan} \tag{3}$$

이때 무가압 여유길이 $l_s$ [mm], 급전구분시스템 최소길이 $l_{\min}$ [mm], 팬터그래프 간격 $l_{pan}$ [mm]

식 3에서 무가압 여유길이는 148[mm]가 되며 이것은 최소 차량속도, 철도차량 역행 및 제동하는데 핵심역할을 하는 추진제어장치(VVVF) 및 보조전원장치(SIV)의 저전압 감지

최소시간 10[ms] 설계요구조건을 충족하게 된다.

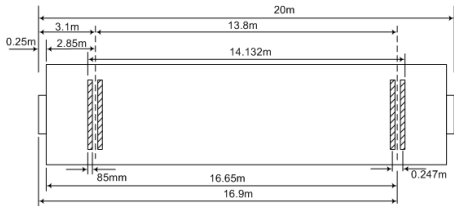



**그림 5** 팬터그래프가 설치된 철도차량 상부 개략도
**Fig. 5** schematic diagram on railway electric vehicle installed a pantograph

### 2.3.1 절연구분장치 구성

상기에서 언급한 무가압 시간을 단축하기 위해 급전구분 시스템 최소길이 14,280[mm]로 하고 절연구분장치에 대해 아래와 같이 검토해 보고자 한다.

a) 일체형 고강도 절연체를 연결하여 그림 6과 같이 14,280[mm]로 조합하는 경우

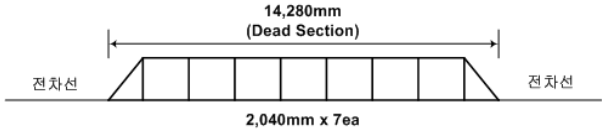



**그림 6** 일체형 절연구분장치 구성
**Fig. 6** Configuration of integrated type neutral section

그림 6에서 전차선 압상량을 고려하면, 정상적인 선로 정적 압상량은 식 4에 의해 계산하면 25[mm]가 된다.

$$y = \frac{s \bullet p}{4T}[\mathrm{mm}] \tag{4}$$

이때 S는 경간 50[m], P는 압상력 6[kg/㎠], T는 가선장력 3[Ton]

한편 절연체 설치시 정적 압상력을 계산하려면 FRP 절연체 중량과 전차선 단위 중량을 고려해야 하는데, 4[kg]인 수지제, 1[kg]인 체결 이음금구 7조, 전차선 단위중량은 1511[g/m], 절연체 단위중량은 2500[g/m] 조건으로 계산하면 21[mm]가 된다.

따라서 일체형 그림 6과 같이 일체형 급전구분장치를 구성하게 되면, 절연체 중량에 위한 국부마모 발생으로 인한 교체주기 허용값은 5 [mm]이상이 되는데 절연체의 자중(自重)에 위해 경점(硬點)요인으로 동적 압상량에 대한 추종성(追從性)이 저하되어 절연체의 국부마모가 발생된다. 또한 접속점 연속에 대한 안전성이 결여와 집전 마찰 소음의 증가, 특히 급전구분장치의 장애가 발생할 경우 복구시간 지연이 예상된다.

b) 고강도 절연체 양단으로 구성된 분리형 절연구분장치를 그림 7과 같이 조합한 경우

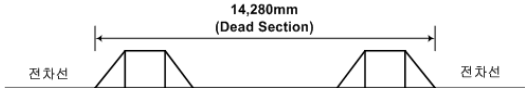



**그림 7** 분리형 절연구분장치 구성
**Fig. 7** Configuration of isolated type neutral section

그림 7에 대해 고강도 FRP 절연체 2,040[mm] 1개씩 양단에 설치된다고 가정하여 전차선 정적 압상량을 계산하면 23.7 [mm]가 된다. 또한 동적 압상량은 운전속도 100[km/h] 미만에서 정적 압상량의 약 3배가 된다.

따라서 분리형 절연구분장치로 구성되는 경우 그림 6의 일체형 절연구분장치와 비교했을 때 절연체의 자중(自重)이 감소된다. 이로 인해 팬터그래프 압상력이 증가하여 추종성(追從性)이 양호하고 접속점이 적어 집전마찰 소음이 적게 된다.

## 3. 결 론

일반적으로 직류-직류 급전절연구분장치을 구성하고 있는 에어섹션인 경우 전차선 상호간에 집전장치인 팬터그래프가 접촉되면 심한 경우 전위차로 인한 전차선의 용융 절손이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 도심구간을 운행하는 도시철도차량에 대하여 전기 철도차량이 자동운전(ATO)으로 선행 전기차량과 간격조정으로 불가피하게 절연구분장치(Air Section) 구간에 정차하게 되는 경우 사고 최소화를 위한 절연구분장치 최소적정길이와 시스템 구성을 제안하였다.

운전속도 80[km/h]로 주행하는 전차선로에서 일반적인 절연구분장치 유효길이는 16,800[mm]이지만 1 unit 차량상부에 설치된 팬터그래프가 2개가 경우 두 개의 팬터그래프 사이의 간격이 14,132[mm]가 되어 절연구분장치 유효길이 내에 팬터그래프가 존재하게 된다. 이로 인해 팬터그래프가 대전류가 흐르는 통로 역할을 하여 용손이 발생한다.

따라서 차량내의 전력변환장치 최소전압 감지시간을 고려했을 때 절연구분장치의 유효길이를 14,280[mm]로 하면 차량이 절연구분장치에 존재할 확률이 매우 적게 되어 대전류로 인한 용손을 최소화 할 수 있다. 또한 제안된 절연구분장치가 짧아짐에 따라 전차선 압상량을 고려해야 되는데, 일체형보다는 분리형 절연구분장치를 적용하는 것이 효과적인 것으로 검토되어 이와 관련된 성능평가와 유지보수 등 다양한 연구에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## References

[1] Yang-Soo Kim et al., Electric Railway Engineering, 2004

[2] Jae-Bong Lee, Ki-Seung Lee et al, “The Development Review of Functional Type Neutral Section Device of Catenary”, 2012 Fall Conference of the Korean Ssociety for Railway, p.404-409, 2012.10

[3] In-Chol Kim, “The Study of Relation most Suitable between Pantograp interface and Neutral Section”,

The Conference of EMECS KIEE, p.325-329, 2002.11
[4] Jae-Bong Lee, Development of Optimal Feeding Section System for Safety Driving, Seoul Metro, 2012.

## 저 자 소 개

**이 재 봉 (李 在 鳳)**

2007년 서울과기대 전기신호공학과 졸업(석사). 1984년~현재 서울메트로 근무, 한국철도기술연구원 기술자문위원
Tel : 02-6110-5470

**김 재 문 (金 才 文)**

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공박). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년 ~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 부교수.
Tel : 070-8855-1664
Fax : 031-462-2944
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr