

도시철도차량 교차 절연구간 안전운행을 위한 방안 연구

백광선, 이강원, 온정근, 이광국  
한국철도기술연구원

Study of Safe Driving Methods of Urban train in AC/DC Dead-section

Baik kwangsun\*, Lee Kangwon, Jung-ghun Ohn  
KRRI

**Abstract** - Study passing method of AC/DC Dead section of urban train and operation time of related device. And search the reason for operation of MCB(Main Curcuit Breaker) and find the safe method to pass dead section.

1. 서 론

1970년대 이후 설치되고 있는 수도권권의 전동차는 단시간에 대량 수송 기능으로 늘어나는 수송량에 적절히 대응하는 최적의 방법으로써 그 역할을 담당해 오고 있으며 점진적으로 그 기능과 역할이 확대되고 있는 실정이다. 수도권권의 전기철도는 일반적으로 정시성, 안전성, 신속성이 보장되어야 하는 것이 기본적인 사명으로서 여러 전동차가 한정된 인프라를 이용하는 까닭에 1회의 사고는 관련된 열차에 영향을 주고 그 파급되는 영향은 예측할 수 없을 정도로 크다. 따라서 시설물은 물론 전동차에 결함이 없어야 하고 운전자 개개인 모두 부주의에 의한 사고가 발생하지 않도록 주의해야 한다. 최근 발생한 대구 지하철 화재사고로 국가적으로 차량의 운행에 대한 안전이 부각되고 있는 상황에서 절연구간 내에서 MCB가 투입되는 현상의 발생은 수도권 전동차를 이용하고 있는 시민들을 불안하게 할 수 있으며, 시설물과 차량의 손상이 예상되는 등의 문제가 되고 있다. 안전에 영향을 주는 사고 원인은 여러 가지가 존재할 수 있으나 그중 교·직 절연구간은 두 가지 형태의 전원을 분리하는 부분이므로 철도차량이 절연구간을 통과하는데 있어 다른 절연구간을 통과하는 것에 비하여 기기의 동작에 많은 요인들이 관련되고 동작자체도 복잡해진다. 따라서 다른 구간에 비해서 발생이 가능한 MCB 투입현상에 대하여 검토하도록 한다. 특히 과천선의 남태령과 선바위간에 있는 지하 교·직 절연구간 내에서 전동차 주회로차단기(MCB) 순차투입 장애는 사고발생시 역공간에 있는 관계로 대피 등에 문제가 발생할 수 있으므로 본 논문에서는 교·직 절연구간에서의 전동차 통과방식과 시간을 검토하고 이 현상을 막을 수 있는 방안을 분석한다.

2. 본 론

2.1 절연구간의 통과 사례 검토

2.1.1 프랑스

절연구간은 공기절연 방식이며, 정차 역 직전에 위치하고 있다. 절연구간 통과를 위하여 운전자는 기계적으로 MCB를 차단시키며 운전중 팬터그래프를 하강시킨다. 절연구간 통과직후 가압구간에 위치한 정차 역에서 운전자는 교대되고 바뀐 운전자는 팬터그래프를 상승시킴에 따라 전동차는 전압을 공급받게 되고 전동차는 기동을 시작한다. 따라서 절연구간 통과 중 팬터그래프는 강하된 상태에 있게 되므로 집전장치간의 거리나 구조와는 상관없이 이상전압의 유입은 없으며 이에 따라 과천선에서 발생할 수 있는 MCB 순차투입 불능 현상은 일

어나지 않는다.

2.1.2 일본

MCB 절환 방식은 우리의 방식과 유사한 방식으로, MCB 투입은 자동으로 진행된다. 과천선의 경우와 차이가 발생하는 점으로는 팬터그래프가 부착된 차량을 연속하여 연결하는 경우는 직류급전방식의 경우에만 제한되어 있다는 것이다. 이 경우를 제외하고는 Single 팬터그래프를 채용하거나 Double 팬터그래프 채용시에는 차량간 팬터그래프의 이격거리를 1차량 간격 이상으로 유지하도록 차량을 배치함으로써 집전장치간의 거리를 확보하고 있으므로 과천선을 통과하고 있는 서울시지하철공사 전동차의 구조와는 집전을 위한 차량구성이 다르다.

2.1.3 1호선(서울역-남영간)

운전방식은 과천선과 같으나 차이점으로는 차량의 집전장치로 Single 팬터그래프를 채용하고 있고 팬터그래프의 간격이 3 차량 간격이 유지되어 하나의 팬터그래프가 가압구간에 진입했을 때에도 다른 팬터그래프는 멀리 떨어진 접지구간 전의 절연구간에 있게 된다는 점이다. 또한 절연구간의 중간에 접지구간(FRP - 접지 - FRP)을 두었고 강체가선이 아닌 카터너리식 가선을 채용하고 있으며 가압선과 절연체가 급구에 의해 직접 연결되어 있는 점과 절연구간이 지상에 있다는 점이 과천선과는 다르다.

2.2 과천선 전동차 교·직 절연구간 검토

2.2.1 교·직 절연구간

국내에는 많은 절연구간이 있으며 교·직 절연구간으로는 1호선의 서울역~남영간과 지하철망리역~청량리역간 그리고 과천선의 남태령역~선바위역간에 있다. 여기에서 문제가 되고 있는 과천선 교·직 절연구간의 구성은 다음과 같다.

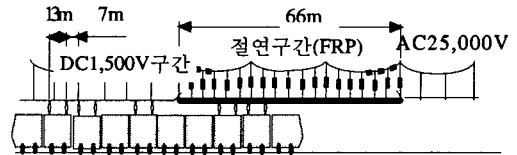


그림 1 과천선 전동차의 절연구간 통과 예

2.1.2 절연구간 운행

2.1.2.1. 운전자 조작 순서

- 열차가 절연구간 90M전에 설치된 ATS 지상자를 통과시 ATS 차상자가 무가압구간 진입 인지용 신호를 수신하여 부저로 경보.
- 기관사가 주간제어기와 AC/DC 절환 스위치(ADS)를 순차적으로 조작하여 MCB를 차단.
- 전동차는 타행상태로 절연구간에 진입, 통과
- 상기 조작 누락시는 모진으로 보호회로가 동작.
- 그매의 전동차 회로 구성은 다음과 같다.

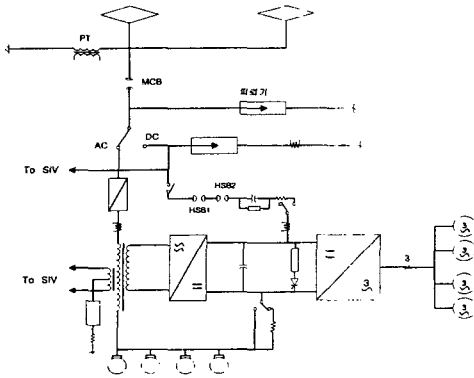


그림 2 과전선 전동차 회로 구성도

## 2.3 절연구간 통과시의 기술적 제검토

### 2.3.1 AC ↔ DC 절연구간

절연구간 90m전에 설치된 ATS 지상자를 열차가 통과할 때 차상자의 ATS 장치가 무가압구간 진입 인지용 신호를 수신하여 운전실내에 부저가 울려 기관사가 준비하도록 하고 전방에 절환 표지판을 마련하여 주간제어기를 조작하고 AC/DC 절환 스위치(ADS)를 조작하여 MCB를 off한 상태에서 AC/DC 절환을 이룩하도록 하며 이외에는 보호회로가 동작하도록 한다. 이에 따른 절환 순서는 다음과 같다.

- 1) DC → AC 구간 진입시 절환 순서
  - ① 주간제어기를 OFF함으로 CONVERTER 입력측 차단기인 K1,K2가 개방되고 변환 장치에서는 GATE를 차단시킴으로 열차는 타행운전 상태가 된다.
  - ② ADS의 조작(AC로 되어있던 스위치를 DC쪽으로 절환)에 의하여 MCBR1과 MCBR2가 소자된다.
  - ③ 역행표를 통과한 후 주간제어기를 ON으로 한다.
- 2) DC → AC 구간 진입시 절환 순서
  - ① 주간제어기를 OFF함으로 고속차단기인 HB1, HB2가 개방되고 주변환 장치에서는 GATE를 차단시킴으로 열차는 타행운전 상태가 된다.
  - ② ADS의 조작(AC로 되어있던 스위치를 DC쪽으로 절환)에 의하여 MCBR1과 MCBR2가 소자된다.
  - ③ 역행표를 통과한 후 주간제어기를 ON으로 한다.

### 2.3.2 AC ↔ AC 절연구간

- 1) AC ↔ DC 절연구간 통과시와 동일한 방식에 의하여 부저가 울려 주간제어기를 조작하여 타력으로 이구간을 통과한다. 여기서는 보조전원장치는 계속 동작한다. → MCBTR과 ACVRTR이 시간지연을 갖고있으므로 MCB의 TRIP은 없다.
  - 2) 역행표를 통과한 후 주간제어기를 ON으로 한다.
  - ① ARC에 의해 절연구간내 절연물(FRP)에 국부적인 이상전압이 걸리고 이에따라 이상마모 및 절연물이 수명저하 발생.
  - ② 순간적인 특고압이 금구, 행거, 조가선, 애자, 전차선의 회로구성예외한 애자의 파손 또는 장기간 피로에 의한 열화 발생으로 수명저하
  - ③ 차량에 있어 Pantograph의 이상 마모 및 절연구간 통과시 FRP를 긁고 지나감으로 FRP의 마모량 증대 및 이로인한 수명저하가 예상
  - ④ 차량이 DC구간 진입시 이 현상이 발생했을 때 AC fuse의 파손, AC구간 진입시 피뢰기의 파손이 나타나고 차량 동작 시스템의 전체적인 수명저하가 예상된다.

## 2.4 운전 방식 및 기술적 문제점 검토

### 2.4.1 ADS 조작후(정상 운전시)

ADS를 정상적으로 절환하여 구간내 최대속도인 시속 80Km의 속도로 절연구간에 진입시 ADS 조작후 MCB가 trip되는 시간은 AC→DC, DC→AC 모두 0.2초이므로 (순서 : ADS 조작 → MCBR1 소자 → MCB-T 여자 → ADCg, ADCm 동작)

$$80\text{Km/hr} \times 0.2\text{sec} \times \frac{1000\text{m}/1\text{Km}}{3600\text{sec}/1\text{hr}} \approx 4.4\text{m}$$

절연구간 전방 4.4m에서 ADS 조작시 절연구간 거리에 관계없이 AC↔DC 절환이 이루어지고 ADCg, ADCm의 동작이 완료되어 전압을 감지시 MCB가 재투입 될 수 있는 상태에 도달함으로써 절연구간의 길이와는 상관없는 안정된 운전상태에 도달할 수 있다.

또한 이때의 통과속도는 전동차가 절연구간 중간에 서지않는 속도 더욱 정확하게 말하면 전동차가 주행저항에 의해 정지한후 전원을 투입받는차의 견인력이 부하보다 작아 견인을 할 수 없는 지점에서 정지하지 않을 속도로 진입해야 한다.

### 2.4.2 ADS 미조작시(모진시)

#### 1) AC → DC

절연구간 진입후 0.35초 후에 주회로(K1,K2)가 개방되고 1.95초(±0.1초)후에 MCB가 차단되오 보호동작이 이루어진다. 이때까지의 진행거리는

$$\frac{0.35\text{sec} \times 80\text{Km/h}}{(3600\text{sec}/1\text{hr})/(1000\text{m}/\text{Km})} + 13(\text{panto간거리}) \approx 21\text{m}$$

가 된다. 또한 MCB가 차단 될 때까지의 최대 진행거리는

$$\frac{2.05\text{sec} \times 80\text{Km/h}}{(3600\text{sec}/1\text{hr})/(1000\text{m}/\text{Km})} + 13(\text{panto간거리}) \approx 59\text{m}$$

따라서 pantograph가 절연구간내에 있을 때 MCB가 차단되므로 DC 구간내에 진입했을 때 AC → DC 절환이 정상적으로 이루어지게 된다.

MCB가 차단되기전에 가압구간에 들어갈 수 있는 최악의 조건은 열차의 속도(속도감소가 없는 것으로 가정)가

$$\frac{1\text{Km}/1000\text{m}}{1\text{hr}/3600\text{sec}} \times \frac{53\text{m}}{2.05\text{sec}} \approx 93.1\text{Km/hr}$$

이므로 현재의 최고속도 80Km/hr를 유지시 MCB 차단에따른 문제는 없다. 만약 속도가 80Km/hr 보다 낮으면 MCB 차단까지의 진행거리가 59m보다 적어짐으로 전동차는 절연구간내에서 MCB가 차단됨으로 AC → DC 절환이 정상적으로 이루어지게 되므로 최저 속도는 구간내 주행저항으로 인해 절연구간내에서 전동차가 서지 않는 속도, 더욱 정확하게 말하면 전동차가 주행저항에 의해 정지한 후 전원을 투입받는 차의 견인력이 부하보다 작아 견인을 할 수 없는 지점에서 정지하지 않을 속도로 진입해야 한다.

#### 2) DC → AC

절연구간 진입 후 0.35초 후에 주회로(HB1,HB2)가 개방되고 1.25초(±0.2초) 후에 MCB가 차단되어 보호동작이 이루어진다. 이때까지의 진행거리는

$$\frac{0.35\text{sec} \times 80\text{Km/h}}{(3600\text{sec}/1\text{hr})/(1000\text{m}/\text{Km})} + 13(\text{panto간거리}) \approx 21\text{m}$$

로 AC에서 DC 구간으로 진입할 때와 동일한 거리를 진행 하게된다.

또한 MCB가 차단 될 때까지의 최대 진행거리는

$$\frac{1.45\text{sec} \times 80\text{Km/h}}{(3600\text{sec}/1\text{hr})/(1000\text{m}/\text{Km})} + 13(\text{panto간거리}) \approx 45\text{m}$$

가 된다. 따라서 집전장치가 절연구간내에 있을 때 MCB가 차단되므로 AC 구간내에 진입했을 때 DC → AC 절환이 정상적으로 이루어지게 된다.

절연구간 진입시의 최저 속도는 2)항과 동일해야 한다.

3) AC → AC

진입후 주회로 개방까지는 0.35sec가 소요되고, MCB 차단까지는 1.95sec(±0.1sec)가 소요된다. 주회로 개방전즉, 과전류 유입으로인한 과전류 보호동작이 발생(2500A 이 상시 MCB trip)하여 운행중 재시동이 필요한 모진 보호 통과 속도는

$$\frac{9m}{0.35sec} \times \frac{3600sec/h}{1000m/Km} \approx 93Km/h가 된다.$$

따라서 현재의 최고속도 80Km/h를 유지시 MCB trip 없이 운전할 수 있다.

또한 절연구간 내에서 MCB 차단현상이 발생하게되는 최저속도는

$$\frac{9m}{1.85sec} \times \frac{3600sec/h}{1000m/Km} \approx 18Km/h가 된다.$$

따라서 전동차의 절연구간 진입 전 속도는 80Km/h ≥ 속도 ≥ 18Km/h가 되어야 한다.

2.5 고장원인 검토

1) FRP 절연체 오염

: 매일 312회 전동차가 운행 및 습판체가 5000여 회 통과로에 통과 카본의 분진이 FRP에 부착되어 절연체를 오염.

2) 차량간 발생 빈도수가 1회에서 41회까지 주회로 차단기(MCB)에 관계되는 각계전기의 동작시간이 일정하지 않을 경우 발생 가능

3) 이상전압 유입 가능성

- Double 팬터그래프 차량 운행시 FRP를 통하여 후위 차량에 이상전압이 유입될 수 있다. (특히, Double 팬터그래프 차량이 중복 연결될 경우 이격거리가 7m이므로 가능성 증가)

- 국내외 사례를 검토했을 때 지하철 1호선 절연구간 및 일본의 경우 집전장치를 Single 팬터그래프로 하여 장애가 없음.

4) FRP 절연체의 유지 보수

: 과전선의 경우, 전동차 운행횟수가 많아서 FRP의 오염 속도가 매우 빠르기 때문에 FRP를 청소하는 방법은 한계가 있고 안전사고 증가, FRP 절연체의 마모 및 세척 작업의 어려움등으로 효율적이지 못함.

5) 집전장치 구조 및 전동차 개선

: 집전장치가 Double 팬터그래프인 구조에서는 팬터그래프간 이격거리가 충분히 유지되어야 하지만 과전선을 운행하는 서울시지하철공사 차량은 충분한 절연거리 확보가 되어 있지 않음. 또한 MCB 관련 계전기들의 동작 시간 설정과 관련하여 현 차량은 FRP의 오염이 없는 경우로 설정되어 계전기 회로 수정 또는 시간 재설정이 필요하리라 사료됨.

2.6 개선 방안 검토

1) 전동차량 집전장치 구조 검토

- 팬터그래프의 이선을 및 집전용량을 재검토하여 전동차량 지붕에 설치된 2개의 집전장치를 1개로 조정
- 집전장치가 부착된 차량을 3량으로 조정(철도청 경우)
- 절연구간에 진입하기 전 선바위역 또는 남태령역에서 1,2번 그리고 7,8번차의 인접 판토를 내리고 절연구간 직후의 역에서 내려진 판토를 다시 상승시켜서 운전.
- 시뮬레이션에 의한 최적의 집전장치 수량 결정이 요망됨.

2) DCVR, ACVR 동작 시간 조정

전동차의 진행속도, 모진시 회로 동작시간, 측정된 이상전압 유입 시간등을 고려하여 현재의 동작 시간인 0.2초보다 긴 MCB 동작시간의 조정이 요망됨.

3) 절연구간 통과를 위한 MCB 투입 방법 수정

전동차가 절연구간 통과후 가압구간에 진입했을 때 MCB 투입이 현재의 자동이 아닌 수동투입 방식으로 절

환하여 실시함.

4) 절연구간 구조 변경

그림 3과 같이 FRP를 6m마다 구분하여 AIR SECTION을 두고 설치한다. FRP가 오염이 되어도 AIR SECTION이 두 전동차의 팬터그래프사이에 존재하여 이상전압의 유입에 대한 차단기능을 하게되므로 이상 전압이 후위차의 집전장치에 유입되지 않음.

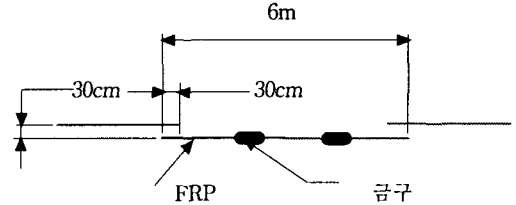


그림 3. 제안된 절연구간 절연물 설치 구조

단, 이방식을 채택할 경우 FRP가 6m 마다 분리되어 설치되어야 하므로 FRP를 지지하는 금구에 대한 검토가 필요하고 설치 비용의 증가, 전동차의 이동 시 FRP 수평 및 높이 차이에 의한 판토의 진동으로 인한 집전부의 수명저하와 FRP의 파손 및 수명저하 그리고 이로인한 전동차의 운행지연, FRP의 고정하여 안정적으로 지지하는 문제등이 발생할 수 있는바, 이에대한 정밀한 검토가 선행되어야 할 필요가 있다.

3. 결 론

3.1 서로 다른 급전구간을 1대의 전동차가 운행하기 위해서는 전동차의 회로 변환 및 급전구간의 분리가 필요하며 이를 위해서는 절연구간이 존재해야 한다.

3.2 과전선 절연구간에는 팬터그래프의 습판체가 빈번하게 FRP 절연체를 일정 압력으로 누르면서 통과함에 따라 습판체의 통과 카본의 분진이 FRP에 부착되므로 절연체의 절연저항 약화는 피할 수 없다.

3.3 가압구간과 FRP 절연체와는 AIR SECTION으로 절연되어 있으나, Double 팬터그래프 차량을 운행할 경우 팬터그래프를 통하여 FRP 절연체 및 후위차량의 팬터그래프에 이상전압이 유입될 수 있다.

3.4 과전선의 경우, 전동차 운행횟수가 많아서 FRP의 절연약화 속도가 매우 빠르기 때문에 FRP를 청소하는 방법은 효율적이지 못하다.

3.5 판토간 충분한 이격거리가 확보되도록 차량을 편성하여야 한다. 또한 이상전압의 유입과 관련하여 MCB 관련 계전기들의 동작 시간 설정이 중요한데 현 차량은 FRP의 절연약화를 고려하지 않고 설정된 관계로 계전기 회로 수정 또는 시간 재 설정에 대한 검토가 필요하리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1](社)日本鐵道電 氣技術協會 電車線裝置 電氣概論 電車線路 시리즈③  
 [2]電氣車의科學 91년, 92년발행분  
 [3]철도청 철도용품 표준규격  
 [4]철도청 외국 지하철철 전기방식 조사 귀국보고 1990.2