

전기철도 절연구분장치와 팬터그래프 인터페이스 최적화에 관한 연구

(김 인 철)
(철 도 청)

The Study of relation most suitable between Pantograph interface And Neutral Section

(Kim In Chol)
(Korean National Railroad)

Abstract - This paper is intended as an investigation of the interface between Neutral section insulators and pantograph interface. Neutral section insulators are installed at the boundary between AC catenary system and DC catenary system, which should provide electrical insulation between two different catenary systems and pass the trains without interruption. As the number of the pantographs installed on the train increased, which is necessary for the VVVF inverter drive trains introduced in recent years, there occurs an serious aspects of the interaction between pantographs and Neutral section insulators. These effects hinder the automatic switch operation of MCB(Main Circuit Breaker) after passing through the section insulators, and lead to the extra-ordinary wear of FRP insulator material of section insulators. Countermeasures in terms of the interface between the Neutral section insulators and electric collection system of train are provided too.

제 1 장 서 론

절연구분장치는 전차선 구간을 전기적으로 절연시켜 구분시키며, 기계적으로는 양측의 전차선과 단절되지 않고 연결되어 팬터그래프가 원활하게 흡동하면서 통과할 수 있도록 하기 위한 장치이다. 설치개소에 따라, 사고시나 작업정전시 해당 전차선 구간만을 한정적으로 정전시켜 열차운행에 영향을 최소화시키거나, 전원계통이 다른 구간간의 위상구분용으로서의 역할을 담당한다. 절연구분장치는 일반적으로 절연체 및 접속금구등으로 구성되어 전차선에 비해 단위길이당 중량 및 탄성특성등이 다르고 전차선 구간중에서 경첩으로 작용하기 때문에, 열차운행속도를 제한하게 되거나 사고 및 장애를 유발하는 등 전차선시스템중에서 가장 취약한 개소로 되어 있고 전기철도 운영 및 유지보수 측면에서 주요과제로 되고 있다.

교/직 절연구분장치는 직류구간과 교류구간이 연결되는 곳에 설치하여, 팬터그래프 흡동에 지장을 주지 않으면서 직류전철구간과 교류전철구간의 전차선을 전기적으로 구분하는 목적으로 사용된다. 직류계통과 교류계통간의 전기절연이 파괴될 경우 사고로 직결될 위험이 있기 때문에, 전기적 절연을 확고히 하면서 열차를 통과시키기 위한 대책이 무엇보다 중요하다. 이 때문에, 절연체 및 공기 갭을 이용하여 충분한 길이의 절연구간을 두어 절연을 확보하거나, 정차역에 절연구분장치를 설치하고 팬터그래프를 강하시켜 절연구분장치를 통과하도록 하는 방식등이 채용되고 있으며, 절연구분장치 구조 및 절연재료에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 지하철운영기관에서 관리하는 직류 1500[V]의 전차선과 철도청에서 관리하는 교류 25,000[V] 전차선이 만나는 지점에 교·직 절연장치가 설치되어 있다. 이러한 교/직 절연구분장치는, 팬터그래프를 강하시키지 않고 교·직 절연구분장치를 흡동하면서 통과하도록 되어 있으며, 절연구간 진입직전에 주회로차단기를 차단하여 타행으로 절연구간을 통과하고, 절연구간을 통과한 차량순으로 주회로전원을 자동투입하도록 되어 있는 등 특수한 구조로 되어 있다.

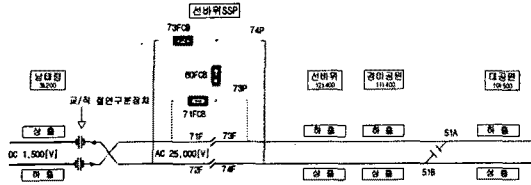
이와 같이 교·직 절연구분장치의 복잡한 구조에도 불구하고 지금까지 비교적 원활하게 운용되어 왔으나, 최근 VVVF 인버터 구동 차량이 주류가 되면서 단위 열차편성당 전동차에 장착하는 팬터그래프 수가 증대하게 됨에 따라 절연구분장치를 흡동하는 횟수가 증대하여 설비의 피로가 가중되면서 장애가 발생할 우려가 높게 되었고, 차량집전시스템과 절연구분장치간의 인터페이스 측면에서의 재검토가 필요하게 되었다.

본 연구에서는, 이와 같은 관점에서, 단위열차당 팬터그래프 수가 증가함에 따라 절연구분장치와 관련하여 야기될 수 있는 문제점으로서 다음 사항을 조사분석하고, 이에 대한 개선방안을 제시하였다. 즉, 전동차 1량당 2기의 팬터그래프가 장착된 차량(더블 팬터그래프 차량이라고 함)의 경우, 13m 간격으로 장착된 2기의 팬터그래프가 전기적으로 연결되어 있기 때문에, 이 부분이 교·직 절연구분장치의 절연구간 일부를 단락시키게 되고, 더욱이 더블 팬터그래프 차량이 연속배치될 경우, 탄소형 흡판체에 의해 절연구분장치의 절연내력이 약화되는 현상과 맞물려 전동차 주회로차단기 순차투입 불량현상을 야기할 수 있다. 또한, 지하구간에 설치된 교/직 절연구분장치의 경우 조가선식과 고정지방식을 절충한 구조로 되어 있어, 선행하는 팬터그래프에 의해 발생된 절연구분장치의 진동으로 인한 충격을 후행하는 팬터그래프가 받게 되어, 절연구분장치 절연체의 이상마모현상이 발생할 수 있다. 이상과 같은 현상은, 전동차의 집전시스템과 전차선시스템간의 조화로운 인터페이스가 확보되지 못하여 발생하는 현상이라고 할 수 있으므로, 전동차 집전시스템 측면 및 전차선과 절연구분장치 측면에서 개선방안을 검토하였다.

제2장 절연구분장치 구조 및 운영현황

지상구간에 설치된 교/직 절연구분장치의 경우 전차선 구간과 동일하게 심플 커터너리 가선 방식으로 되어 있어 팬터그래프 압상력을 조가선과 전차선에서 흡수할 수 있는 구조로 되어 있으나, 지하구간(R-bar 강제가선식)에 설치된 교/직 절연구분장치는 공간상의 제약 때문에 조가선 방식과 R-bar 브래킷에 의한 고정지방식을 절충한 특수한 가선구조로 되어 있고, 터널내의 분진 등과 같은 열악한 환경에 노출되어 있다.

2.1 설치장소



설치년도 : 1994. 01

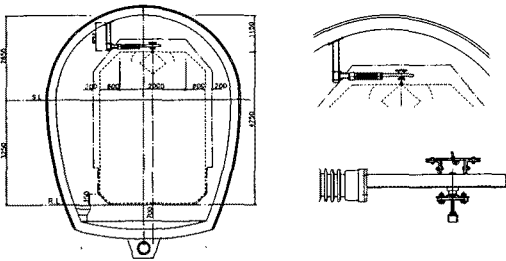
설치장소 : - 상선 (금기 13k 410m ~ 13k 276m)
- 하선 (금기 13k 180m ~ 13k 246m)

2.1 장치구성

지하구간은 터널 구조물의 단면을 축소하여 건설비를 절감하기 위하여 강체가선방식을 채택하고 있는데 강체구간에 설치된 절연구분장치의 구성도이다.

과관선에 시설된 교류/직류 절연구분장치는(이하 교/직 절연구분장치) 교류 25,000[v] 전차선과 직류 1,500[v] 전차선의 중간에 설치되며 전기적 절연특성이 뛰어난 FRP 절연체를 이용하여 절연구분장치를 설치하고, 이를 강체가선과는 별도의 인유구간을 설정하여 독립적으로 지지하는 형태로 되어 있다.

절연구분장치는 길이 2m의 FRP 절연체 37개를 직렬로 연결하여 총 74m이며 강체가선구간과 중복되지 않는 순수 절연구간은 66m에 달한다. 전기적인 측면에서, 이 FRP 절연구간은, 교류와 직류구간의 전기적 절연을 확보하도록 되어 있으며, 또한, 기계적 측면에서는, 전차선을 대신하여 전동차 팬터그래프의 압상력을 지지하여 팬터그래프가 원활하게 습동하면서 통과할 수 있도록 설계되어 있다. 절연구분장치의 지지는 조가선에 의한 현수 방식으로써, 턴버클에 의한 수동장력조정식으로 되어 있으며, 6m 간격으로 R-bar 브래킷을 설치하여 터널 천장에 고정하도록 되어 있다.



[터널 단면도]

2.2 열차운영현황

과거 수도권 전동차는 직류전동기를 사용하고 저항제어 방식을 채택하였으나, 최근에는 VVVF 인버터에 의한 유도전동기 구동방식을 사용하고 있다. 이 방식은 구동전동기 고효율화, 전력성능향상등 많은 장점을 가지고 있지만, 인버터 입력전원이 차단되는 것을 최소화하기 위해 차량당 2기의 팬터그래프를 장착하게 되고(이후, 더블 팬터그래프라고 함), 열차편성당 팬터그래프 수가 증가하는 것이 일반적이다.

수도권 전철구간의 경우 운행량이 많고 차량에 장착된 팬터그래프가 많기 때문에, 팬터그래프와 절연구분장치가 습동하는 횟수가 많다. 표1은 과관선구간의 예로써, 1일 평균 1,154회, 1주에 약 8,080회 팬터그래프가 절연구분장치를 통과하게 된다. 이 수치는 과거 저항제어 차량

과 비교하여 3배정도 증가한 것으로 FRP 절연체의 마모 및 절연열화가 증가하게 된다.

절연구간 통과 운행량(팬터그래프 습동량)
Train passage through insulation section

소속	구분	평일	토요일	일요일	1주 열차운행	팬터 수량	1주 습동회수	1주 습동회수 합계
한국철도	상선 (1일 7회×5일)	385	80	68	533	6	3,198	상선 : 8,088 하선 : 8,074
	하선 (1일 7회×5일)	385	79	65	529		3,174	
지하철	상선 (1일 7회×5일)	355	69	65	489	10	4,880	
	하선 (1일 7회×5일)	355	70	65	490		4,900	

[과관선 열차운행 현황]

3. 교/직 절연구간 통과후의 MCB 자동투입 불량

교/직 절연구분장치 통과시, 절연구간 진입직전에 운전사가 주간제어기와 AC/DC 절환 스위치를 조작하여 MCB를 차단하고 타행으로 절연구간을 통과한 후, 가압구간에 진입한 차량별로 전차선의 전압을 검지하여 MCB를 자동적으로 투입하도록 되어 있다. 만일 MCB 순차투입이 원활하게 되지 않았을 경우에는, 전체 열차편성에 대하여 전동차 주회로를 차단한 후, 다시 회로를 투입하여 운행하여야 하며, 이 시간동안 전동차는 타행운전을 계속하여야 한다.

3.1 MCB 순차투입 불량 현상

전차선 설비 측면에서는 절연구분장치를 구성하는 절연체의 절연내력 저하현상을 원인으로 찾을 수 있고, 차량 구조 측면에서는 더블 팬터그래프 차량이 연속해서 연결된 열차편성에 따른 집전시스템 구조가 복잡적으로 작용하여 MCB 순차투입 불량현상을 발생한다고 분석된다. 차량의 주회로 차단기는 교/직 절환스위치 조작에 의하여 일제 차단되고 투입은 전압이 인가된 유니트부터 순차적으로 자동 투입되는 방식이며 동작순서는 교/직 절환스위치 조작에 의하여 MCBR1 소자 → MCB 차단 → 교/직절환기 전환 → ACVR, ACVRTR (DCVR, DCVRTR)동작 → MCBR1 여자 → MCB C 여자 → MCB 투입의 순서에 의해서 차단 및 투입이 행하여지며 ACVR, ACVRTR (DCVR, DCVRTR)은 어떤 이유에서든지 한번 동작되었다가 개방되면 기기보호를 위하여 순차적으로 자동 투입되지 않고 수동으로만 투입 가능하도록 되어있다.

수도권 전철의 경우, 열차통행량이 많고 다중 팬터그래프를 채용하는 등으로 팬터그래프와 절연구분장치와의 습동횟수가 많아 FRP 절연막대의 절연성능이 저하되기 쉬운 환경에 놓여 있다. 즉, 팬터그래프의 습동체는 동과 카본등으로 되어 있어, 이 재질들이 FRP 절연막대의 표면에 부착하여 절연내력을 떨어뜨리게 된다.

더블 팬터그래프 차량의 경우, 이 팬터그래프들은 전동차 지붕위에 13m 간격으로 설치되는데, 하나의 팬터그래프가 전차선에서 이선되더라도 다른 쪽의 팬터그래프로부터 전력을 공급받을 수 있도록, 전선으로 서로 연결되어 있다. 이에 따라, 절연구간을 통과할 때는 13m에 달하는 절연구간을 전기적으로 단락시키는 효과가 발생하게 된다.

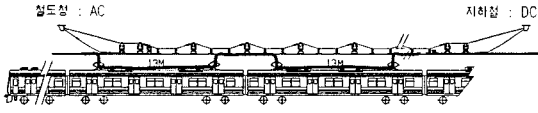
그림 2와 같이 더블 팬터그래프 차량이 연속으로 편성되어 운행될 경우, 선행 차량의 팬터그래프 연결선에 의해 전차선과 절연구분장치간의 공기 갭이 단락되고, 전차선

전압이 선행 차량의 팬터그래프를 거쳐 절연내력이 약화된 FRP 절연막대를 통하여 후속 차량의 팬터그래프에 인가될 수 있다. 이때, FRP 절연막대와 평행하게 조가선을 통하여 전압 유입도 발생할 수 있다. 이상전압 유입이 지속될 수 있는 최대지속시간은 선행차량 팬터그래프 간 연결선이 공기 갭을 단락시키는 시간이므로, 전동차 통과 속도를 60Km/h로 가정하면 다음과 같다.

$$13m \div 60km/h = 780msec$$

이때 전차선으로부터 절연구간에 위치한 차량의 팬터그래프에 인가되는 이상전압이 일정 크기(AC20KV, DC790V)를 넘고 일정시간(200msec) 이상 지속하게 되면 전압검지 계전기가 동작하여 MCB가 순간적으로 투입하게 된다. 그러나, 이는 전차선 구간에 진입하기 전에 순간적인 전압유입에 의해 MCB가 투입된 것으로서, 인가전압이 저하될 경우 MCB는 다시 차단되고, 이러한 동작을 할 경우에는 가압 전차선 구간에 진입한 후에도 MCB 순차 투입이 이루어지지 않게 된다.

과천선 운행초기 절연구간 통과시 순차투입이 되지 않는 현상이 발생하여 사회적으로 큰 이-수가 되었으며 이를 해소하기 위하여 절연구분장치의 절연능력 향상을 위하여 조가선, 드롭퍼에 절연재를 보강하고 현차시험을 하였지만 같은 현상이 발생하여 차량시스템을 분석한 결과 주회로차단(MCB) 보조계전기의 오동작과 차량 Type 선정시 1위 팬터그래프와 2위 팬터그래프가 Arc 발생거리에 대하여 충분한 이격거리를 확보하지 못한 것으로 검토되어 차량설비를 보완한 사례가 있다.



절연구간 운행중 순시전압 유입 현상
Instantaneous power inflow in the course of insulation section

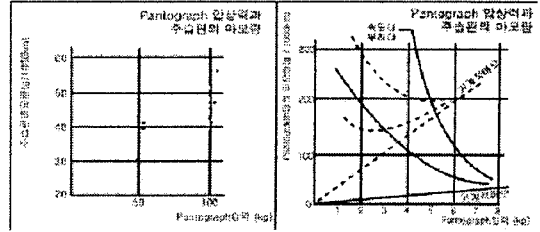
3.2 절연구분장치의 절연저항 저하

절연구분장치의 절연내력을 저하시키는 가장 큰 원인은 절연체의 오손에 의한 전압유입의 가능성이다. 팬터그래프의 집전판은 “동(銅)계합금소재”와 “카본”으로 구성되어 있으며 집전판의 일부가 FRP 절연체에 용착 하게되고 절연성능을 저하시키게 된다.

특히 지하구간은 가선의 높이가 낮아 팬터그래프의 압상력이 약 5.5kg~6kg으로 지상구간보다 1kg 높아지게 되며 이에 따라 마찰력이 증가하고 많은 양의 동(銅)과 카본이 FRP에 용착 하게된다.

또한 지하구간의 특성상 열차운행중 발생한 분진이 분산되지 못하고 전차선로 설비에 잔류하게 되어 절연내력이 저하되는 원인이 되고있다.

지하구간에서 발생하는 분진과 전차선로 설비의 상관관계를 확인하기 위하여 지지에자(NSP 50)에 쌓인 먼지를 채취하여 분진성분을 분석한 결과 철(Fe), 알루미늄(Al) 등 전기절연을 저해하는 성분이 약 29%정도 함유되어 있는것을 확인할 수 있으며 절연구분장치는 물론 전차선로 설비 전반에 영향을 주고있어 분진에 대한 특별한 관리가 필요하며 Maintenance 측면에서 절연구분장치의 절연내력 저하는 설비의 점검 및 유지보수에 많은 시간과 인력, 비용을 필요로 하게된다.



[압상력과 습동판의 마모관계]

시료명	시험항목	시험결과	시험방법	비고
과천선 분진	Al(Wt %)	7.31	기기분석 (ICP-OES)	
	Fe(Wt %)	20.7		
	Pb(Wt %)	0.14		
	Cu(Wt %)	0.96		
	계	29.11		

절연구분장치의 절연내력 저하는 필연적인 것으로 현재와 같은 구조에서는 분진부착을 피할 수 없으므로 이러한 절연내력 저하를 예방하기 위해서는 주기적인 청소를 통하여 부착된 분진을 제거하여 주어야 한다.

3.3 절연구분장치 길이

전동차가 절연구간을 통과할때 Notch-Off를 원칙으로 하고 있지만 절연구간의 길이를 정할 때 가장 문제되는 것은 Notch-On 상태로 통과하는 경우의 아-크 신도이다. 이 값은 현차 시험 결과 3[mm/kKA] 정도로 나타났으며 아-크 에너지를 최대 2600[kVA]로 가정하면 색선의 길이는 2600[KVA] × 3[mm/KVA] = 7800[mm] ≒ 8[m]가 된다.

전기차가 교/직류 구간으로 진입하는 경우의 절연구분장치 길이는 기기류의 조건과 현차 시험 등 다음의 결과에 따라 정하고 있다

$$\text{유효길이[m]} = \frac{\text{총동작시간}}{\text{운전속도[km/h]}}$$

$$\text{※ 총동작 시간} = A+B+C+D$$

여기서,

A: 아크 시간[ms]

아크의 지속 시간을 말하며 차량 시험결과에 약간의 여유를 더하여 정하고 있다.

B: 전압 계전기 동작시간 [ms]

절연구분장치에 진입하여 무전압을 감지하여 동작되는 계전기를 말하며 동작 시간이 짧을수록 좋겠지만 일반 구 분장치의 통과나 이선 현상에 의한 동작으로 운전 에 지장을 주게 되므로 약간의 동작 지연 시간을 갖고 있다.

C: 차단기의 차단시간 [ms]

전압 계전기의 동작에 의한 차단기의 차단 시간을 말한다.

D: 여유 [ms]

E: 전기차 속도에 의한 유효 길이[m]

F: 전기차의 팬터그래프의 간격[m]

이상의 방법에 따라 수도권 전동차의 예를 들어 소요 절연구분장치의 길이를 구하면 다음과 같다.

항 목	전동차(VVVF)	비 고
A+B+C+D	1410	
최고 운전 속도시 유효 색선 길이	43.08	110[km/h]
팬터그래프의 간격	14.05	
소요 색선 길이	57.13 ≒ 60	

여기에 여유 6[m]를 두어 66[m]를 표준으로 하여 설치하고 있다.

3.4 절연구간 표지 및 궤도회로

절연구분장치가 설치된 구간의 궤도에는 전차선측과 같은 역할을 하는 궤도회로 절연구간이 설치되어 있다. 절연구간에는 ATS 장치에 의해 직류/교류 절연구간 예고 신호를 송신하는 예고장치가 설치되어 송신기에서 발생한 예고용 신호를 궤도에 설치된 지상차(송신코일)에 의하여 ATS 차상장치로 정송하고 차상에 탑재된 ATS 수신기에 의하여 이 신호를 수신하여 절연구간의 위치를 예고하고 있다. 이 장치는 기관사에게 절연구간에 대한 주의를 환기시켜 적절한 시기에 교/직 절환스위치를 조작하도록 하여 Notch-off 하도록 유도하여 열차의 안전운행을 도모하게 된다.

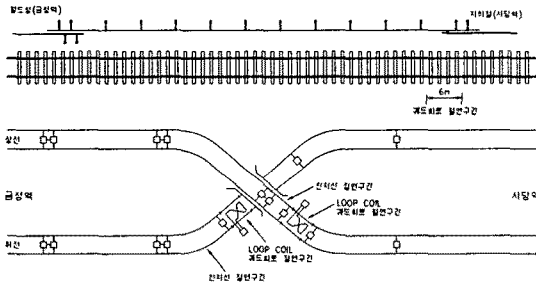


그림 3. 절연구간 궤도회로

3.5 개선방안

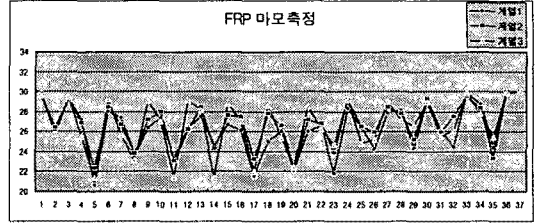
차량측면에서의 개선방안으로서는, 앞서 검토한 것처럼 전차선으로부터의 절연구간에 위치한 차량에의 전압 유입이 최대 0.78초 까지 지속될 수 있으므로, 전차선 전압을 검지하여 MCB를 투입시키는 계전기의 동작시간을 현재의 0.2초에서 0.8초 이상으로 증가시켜 설정하는 방안이 유력하다. 차량운행방식 측면에서는, 교/직 절연구간 통과후 MCB 투입을 수동으로 하는 방식과 교/직 절연구간 진입전에 차량에 장착된 2기의 팬터그래프중에서 1기를 강하시키고 교/직 절연구간을 통과한 다음 팬터그래프를 상승시켜서 정상운행하는 방식을 검토할 수 있다.

전차선 시설 측면에서는, 절연구분장치가 지하구간의 제한된 공간에 설치되기 때문에 구조 개량등이 용이하지 않고, FRP 절연막대를 주기적으로 청소하여 절연성능을 유지하도록 하는 방법이 유력하다. 또한, 조가선을 경유한 이상전압 유입을 방지하는 위해서는 조가선 중간에 절연애자를 삽입하고, 조가선으로부터의 FRP 절연막대의 지지에는 기존의 행거대신에 절연성이 있는 걸이애자를 사용하는 것이 유리하다.

제 4 장 절연구분장치 절연체의 이상마모 현상

4.1 FRP 절연막대 이상마모 현상

교/직 절연구분장치의 FRP 절연봉들은 위치에 따라 마모량이 다르게 나타나고 있다. 그림은 FRP 절연봉들의 마모량을 측정된 것으로, 횡축의 번호는 길이 2m의 절연봉들의 일련번호를 나타내며, 6m 간격(FRP 절연봉 3개)으로 설치된 R-bar 브래킷 지지점간의 중앙에 위치한 FRP 절연봉의 마모가 높게 나타나고 있다. 표는 교/직 절연구분장치 설치 이후의 주요 정비내역으로써, 팬터그래프를 다수 탑재한 VVVF 인버터 차량이 도입되기 시작한 2000년 이후에 특정 위치의 FRP 절연막대가 심하게 마모되어 빈번하게 교체되었음을 알 수 있다.



FRP 절연봉 마모량
Measurement of wear of FRP insulator rod

이러한 FRP 이상마모 현상은 다음과 같이 절연구분장치 유지보수에 취약요인으로 작용하고 있으며, 차량의 팬터그래프에도 나쁜 영향을 미친다.

- 교/직 절연구분장치는 취약설비로 분류되어 매월 1회 점검을 시행하여야 하므로 유지보수에 많은 시간과 인력을 필요로 한다.
- 고가로 수입하는 절연구분장치의 교체주기가 짧아져 예산낭비를 초래한다.
- FRP 절연막대의 이상마모는 팬터그래프 습동판의 불균일한 마모를 발생시키고, 심할 경우 팬터그래프가 손상되는 사고가 발생할 수 있다.

4.2 FRP 절연체의 마모율

절연구분장치 FRP 절연체의 평균마모율을 산출하는 것은 설비의 유지보수에 있어서 교체주기를 산정하는 매우 중요한 과제이지만 우리나라에서 이러한 DATA가 산출된 것이 없다.

과천선 교/직 절연구분장치에 대하여 1999. 3월부터 마모율을 매월 측정하여 왔지만 FRP의 마모가 불규칙하여 평균마모율을 산출하기가 어렵다.

일본의 자료를 살펴보면

교/직 절연구분장치 마모율
(mm/10,000panto)

마모율 :

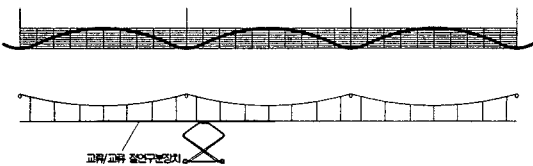
구 간	상 하	기 간	평균마모율	최대마모율
取手-藤代間 (교·직)	상	H1. 06 ~ H3. 12	0.24	0.38
		H3. 12 ~ H6. 03	0.17	0.30
	하	63. 05 ~ H3. 12	0.18	0.26
		H3. 12 ~ H6. 04	0.22	0.29
牛久·荒川神間 (교·교)	상	H2. 10 ~ H5. 04	0.17	0.24
		H5. 04 ~ H5. 09	0.14	0.30
	하	H1. 09 ~ H4. 12	0.16	0.24
		H4. 12 ~ H5. 08	0.24	0.31
土浦·神立間 (교·교)	상	H1. 09 ~ H4. 12	0.14	0.15
	하	H4. 12 ~ H5. 08	0.12	0.14

○ 절연구분장치 교체주기

구간	상하	교체주기	교체예정
取手・藤代間 (교·직 데드섹션)	상	30개월	H9. 5
	하	30개월	H9. 5
牛久・荒川神間 (교·교 데드섹션)	상	52개월	H9. 8
	하	52개월	H9. 8
土浦・神立間 (교·교 데드섹션)	상	67개월	H8. 4
	하	67개월	H8. 4

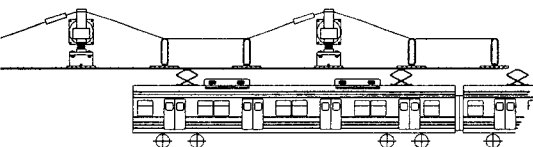
4.3 이상마모 원인분석 및 개선방안

지상구간에 설치된 절연구분장치의 경우, 심플 커티너리 가선방식으로 되어 있어, 팬터그래프 압상력에 대하여 그림에 보이는 것처럼 일정한 압상계적을 그리면서 열차 속도 및 팬터그래프의 충격을 충분히 흡수한다. 그림은 심플 카테나리 방식의 절연구분장치의 FRP 절연봉 마모량을 측정 한 사례로써, FRP 절연봉의 위치에 관계없이 균일한 마모량을 보이고 있다.



심플 카테나리 방식 절연구분장치의 압상 계적
Lift-up locus of simple catenary type section insulator

그러나, 지하구간에 설치된 절연구분장치의 경우 FRP 절연봉 위치에 따라 마모량이 차이가 많다. 이는 교/직 절연구분장치의 구조적 특성과 팬터그래프 다중 탑재 전동차간의 상호작용에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 즉, 그림의 교/직 절연구분장치 지지구조에 보이는 것처럼, R-bar 브래킷은 6m 간격으로 설치되어 절연구분장치를 고정시켜 팬터그래프의 압상력을 억제하는 반면에, 브래킷과 브래킷 사이의 6m 구간은 심플 카테나리 가선의 조가 현수식으로 되어 있어, 절연구간별로 장력이 균일하지 않고 팬터그래프 통과시 부분적인 진동이 발생할 수 있다.



교/직 절연구분장치의 지지금구 구조
Configuration of supporting hardware for AC/DC section insulator

이와 같이 절연구분장치 구간별로 압상량이 불균일한 것은, 팬터그래프 압상력에 대한 절연구분장치의 탄성이 일정하지 못하다는 것으로서, 팬터그래프의 압상력과 속도에 의한 충격이 절연구분장치에 균등하지 작용하지 않게 됨으로써 절연구분장치 이상마모의 직접적인 원인이 되고 있다. 전기철도 보수장비를 이용하여 절연구간을 70Km/h 속도로 운행하면서 분석해 본 결과 FRP 연결금구 통과시 절연구분장치와 팬터그래프가 충격을 받는 것을 확인할 수 있었다. 이에 더하여, 다수의 팬터그래프

가 연속적으로 절연구분장치를 통과할 경우, 선행하는 팬터그래프 통과시의 충격이 균등하게 흡수되지 못하고 절연구분장치에 진동이 발생하게 되고, 여기에 후속하는 팬터그래프의 충격이 더해짐으로써 절연구분장치의 이상마모가 발생한다.

이상과 같은 절연구분장치 이상마모를 줄이기 위해서는, 팬터그래프 통과시의 충격으로 인한 절연구분장치의 부분 진동을 억제시키는 것이 선결과제라고 할 수 있다. 이를 위해, 기존의 R-bar 브래킷간의 부분적인 조가선 방식을 폐지하고, 절연구분장치의 모든 지지점에 R-bar 브래킷을 설치하여 지하구간 전차선과 같은 R-bar 가선방식으로 함으로써, 절연구분장치의 구간별 압상량 편차를 최소화하고 절연구간 전체에 걸쳐 기계적 균일성을 확보하는 방식이 효과적이다.

5. 결론

교/직 절연구분장치는 교류 전차선구간과 직류전차선 구간간의 전기적 절연 및 열차통과를 위한 기계적 연속성을 확보하여야 하기 때문에, 전기철도 구간중에서 취약 개소로 작용하고 있다. 더욱이, 최근 차량에 탑재되는 팬터그래프수가 증가함에 따라, 전차선으로부터의 이선현상이 감소하고 집전성능은 향상되었으나, 반면에 절연구간 통과시의 전동차 팬터그래프들과 교/직 절연구분장치간의 상호작용이 복잡하게 되었다. 즉, 선행 차량의 팬터그래프와 절연구분장치 구간을 통하여 절연구간에 위치한 차량의 팬터그래프에 전차선 전압이 유입됨으로써 MCB 자동투입에 장애를 초래하거나, 팬터그래프가 연속적으로 절연구간을 통과하면서 타격을 가하여 절연구분장치 절연재가 이상 마모되는 현상등이 발생한다. 이와 같은 현상들은, 집전시스템과 절연구분장치간의 상호작용을 고려하여 전체적인 시스템으로서의 최적화를 고려하지 못하고, 차량시스템과 전차선시스템을 각각 별도로 최적화하는 데서 야기되는 문제라고 할 수 있다. 따라서, 이러한 문제들을 극복하고 교류 및 직류 전철이 직결된 전기철도 시스템의 최적운행을 확보하기 위해서는, 절연구분장치를 포함한 전차선시스템과 팬터그래프를 포함한 전동차시스템간의 인터페이스를 충분히 고려하여 전체시스템의 최적화를 추구하는 시스템 공학적인 관점에서 접근하는 것이 바람직하다.

[1] JR 교본연구회 공저, "철도기술자를 위한 전기개론 전차선로 시리즈③ 전차선 장치", 일본철도전기기술협회, 1998
[2] H.Nagasawa외 3인, "전차선의 고속용 데드섹션", RRR 제10권, pp.27~32, 1992. 10.
[3] J.I.Goroshkov, "Use of polymer materials inelectric railway overheads", Rail International, pp.7-24, January 1977,