

4호선 전동차 판토그라프 주습판 마모현상에 관한 연구

A Study on the Wearing Phenomenon of Pantograph Slider for the SEOUL METRO Line 4 Rail Vehicles

김영규*

양용준**

Kim, Young-Gyu

Yang, Yong-Joon

ABSTRACT

Pantograph of the electric train is the important part receiving current by adhering contact wire. Wearing rate of pantograph or contact wire is changed by the type of pantograph and material of adhering part. In special, the weather influences the relative wearing rate and wearing type of pantograph Slider and Contact wire with steep wearing in arc and life cycle of pantograph slider. Presently, the weather causes side-wearing and over-wearing of pantograph slide installed in electric train. So it is difficult to manage and operate the electric train. Although the quality of slide using in line4 vehicle was finished the test in line 2 vehicle experimentally, it has to apply after pantograph is installed in some electric trains and check the influence in it and contact wire. It is because line4 section is very different from line2 section. Experimental application is the sequence to certify the safety and abrasion resistance importantly by enlarging experimental application with increase of the experimental electric train.

The length of line4 in Seoul Metro is 71.5[km]. It is long section. The line is mixed DC 1,500[V] section and AC 25,000[V] section. It has underground section of 41.5[km] and ground section of 30[km]. Ground section is about 42% and receives much influence in the rain during the rainy season. After experimental application we found that this pantograph slide has twice as much abrasion resistance despite a little deviation and found the occurrence probability of arc and side-wearing is decreased considerably.

1. 서 론

전동차 판토그라프는 전차선에 습동하여 전류를 수전하는 중요한 부품이다. 판토그라프 형태와 습동부 재질에 따라 전차선이나 판토그라프의 마모량의 편차가 크게 발생한다. 특히, 날씨에 따른 판토그라프 주습판(Slider)과 전차선의 상대적인 마모량과 마모형태는 아크에 의한 급격한 마모와 더불어 전차선과 판토그라프 주습판의 수명과 연관되어 중요한 인자로 작용하고 있다. 현재 전동차에 적용된 판토그라프 주습판은 날씨(우기)에 영향을 받아 편마모 현상과 과마모 현상이 발생하여 전동차 관리 및 운용에 많은 제약을 주고 있다. 금번 서울메트로 4호선에서 시험 적용한 주습판 재질은 2호선에서 시험 적용을 마친 재질이지만 전동차 운전조건이 현저하게 상이한 4호선 구간에서의 적용이기 때문에 특정 편성 전동차에 시험 취부한 후 판토그라프와 전차선의 영향을 점검하여 안전성을 확인한 후 4호선 전체로의 확대 적용에 대한 시험적인 적용이다. 시험 적용은 시험 전동차를 증가시켜 시험 적용을 확대하여 안전성과 내마모성을 중점적으로 확인하는 절차이다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원, 서울메트로 차량본부, 정회원 (02)520-5642, FAX : (02)520-5619

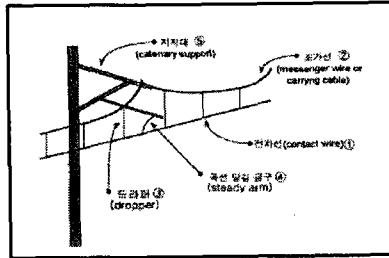
** 서울메트로 차량본부, 정회원

서울메트로 4호선의 길이는 71.5[km]로 비교적 긴 구간이고 DC 1,500[V] 구간과 AC 25,000[V] 구간이 혼재되어 있고 지하구간 41.5[km]과 지상구간 33.6[km]로 구성되어 지상구간의 비율이 약 47[%]로 우기 기간 중 빗물에 의한 영향을 많이 받는 특징을 보이고 있다. 시험 취부 결과 기존 재질의 주습판에 대비하여 약간의 편차는 있었지만 약 2배 정도의 내마모성을 가지고 있는 것을 확인하였으며 또한 아크 발생 확률과 편마모 발생현상에서도 현저하게 줄어든 것을 확인하였다.

2. 서울메트로 4호선 전차선 및 판토그라프 구성 개요

2.1 4호선 전차선 구성

4호선 전차선은 전동차 판토그라프에 전원을 공급하는 장치로 <그림1>과 같은 구조를 가지며 판토그라프 주습판과 직접적인 습동을 하는 전차선, 전원을 공급하는 조가선, 조가선과 전차선을 연결하는 드롭퍼, 드롭퍼는 전차선의 저짐을 조가선이 흡수하는 방식을 지상구간에서 적용하고 있으며, 지하구간에서 터널 천정에 알루미늄제의 T형재를 애자에 의해 지지시켜 놓고 아래부분에 알루미늄제 이어(Ear)에 의해 전차선을 연결 고정하는 강체방식을 적용하고 있다.^{1,3}



<그림1> 4호선에 지상구간에 적용된 심플 카테나리 전차선의 구조

4호선은 총 연장 71.5[km]로 판토그라프 주습판 재질이 철계인 1호선을 제외하고 동계 주습판을 사용하는 최장의 구간이고 DC 전원과 AC 전원을 혼용하여 사용하며 지상구간의 비율이 47[%]로 강수량에 따라 주습판 마모량의 편차가 발생하고 있으며 규격품 재질 주습판과 개선품 재질 주습판의 마모를 비교하여 결과를 얻기에 적합한 노선이다.

<표1> 서울메트로 4호선 전차선 현황

구간	가선형태	거리(km)	전원형태(V)	비고
당고개-쌍문	심플 카테나리 방식	4.9	DC 1,500	지상구간
쌍문-이촌	강체 방식	19	DC 1,500	지하구간
이촌-동작	심플 카테나리 방식	2.7	DC 1,500	지상구간
동작-금정	강체 방식	18.9	DC 1,500(동작-남태령) AC 25,000(남태령-금정)	지하구간
금정-오이도	심플 카테나리 방식	26	AC 25,000	지상구간

2.2 판토그라프 구성

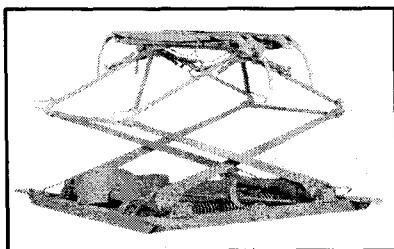
판토그라프는 DC 1,500[V]의 강체 방식(지하구간)과 AC 25,000[V]의 심플카테너리 방식(지상구간)에서 전차선으로부터 집전의 목적으로 사용되어지고 압상력(Control Force)은 지하구간과 지상구간에서 동일하게 6.0kgf로 설정되어 판토그라프의 작용높이가 변화하여도 일정한 압력으로 전차선을 추종하며 접촉하여 집전하는 구조이다.²

4호선 전동차에 적용된 판토그라프는 <그림2>와 같은 구조의 12부분 【기초 프레임 조립체(Base Frame Ass'y), 베어링 조립체(Main Bearing Ass'y), 하부 프레임 조립체(Lower Frame Ass'y), 실린더 조립체(Cylinder Ass'y), 균형장치 조립체(Equalizer Bar Ass'y), 주 스프링 조립체(Main Spring Ass'y), 상부 프레임 조립체(Upper Frame Ass'y), 팬 지지대 조립체(Pan Support Ass'y), 집전판 조립체(Collection Shoe Ass'y), 공기 배관 조립체(Air Pipe Ass'y), 링크 커버 조립체(Link Cover Ass'y), 편동선 조립체(Shuttle Ass'y)】으로 구성되어 일정한 압상력으로 <그림3>의 집전판 조립

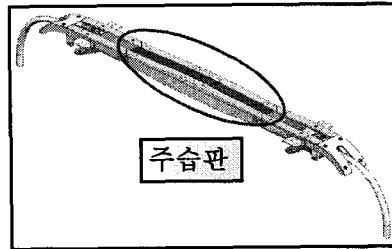
체의 주습판이 전차선에 습동하도록 구성되어 있다.⁴

<표2> 판토그라프 규격

구 분	적 용	비 고
전차선방식	지상 심플카테너리 전차선, 지하 강체 전차선	
동작방식	공기상승, 스프링하강	
압상력	6kgf	
주습판 재질	동계 소결합금	BE11



<그림2> 판토그라프(Pantograph Ass'y)



<그림3> 집전판 조립체(Collector Shoe Ass'y)

3. 주습판(기존품과 개선품의 비교)의 요구조건(구성요소)

전기전도도와 집전능력이 좋아 접촉점에서 에너지 손실이 없어야 하며 상대 전차선에 대하여 우수한 윤활특성과 낮은 윤활특성과 낮은 마찰계수로 습판의 마모가 적을 것과 고속주행과 외력에 의한 구조적인 파단이 없도록 적절한 기계 강도를 갖추어야 하고 아크등에 의한 전력손실이 없는 것을 요구하고 있다.⁵

기존 주습판의 재질은 주로 동, 주석, 흑연분말을 주재료로 사용하여 소결한 다음 전도성 기계유를 함침시켜 제조하였기 때문에 전도성 기계유에 함침하여 윤활성을 증대시키더라도 사용된 주재료의 특성으로 인하여 내마모성에서 일정의 한계를 가지고 있었다.²

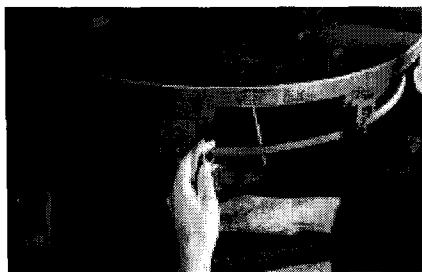
개선 주습판은 주성분인 구리의 함유량을 82~88[w%]로 유지하여 전도성의 하락으로 집전능력이 저하되는 것과 마찰특성으로 전차선(Contact Wire)에 영향을 주는 것을 방지하였고, 주석의 함유량은 8~12[w%]로 유지하여 기계적 강도 및 내마모성을 향상시키고 저용점 금속성질로 인한 내아크성 및 내열성이 떨어지는 것을 방지하였으며, 흑연의 함유량을 0.5~3[w%]로 유지하여 내아크성과 윤활성을 확보하고 성형과 소결성이 저하되는 것을 방지하였다. 또한, 내마모성을 위하여 경금속의 함유량을 4~7[w%]로 유지하고 입자크기를 45~1000[μm]로 제한하여 마찰판 전면에 걸쳐 균일한 분포와 편석이 일어나지 않게 함으로 편마모 발생과 전차선과의 마모를 감소시켰으며, 각 재료를 성형하여 약 650~850[°C] 온도에서 소결하여 인장강도 저하, 마모량 증가 등을 방지하였다.²

4. 4호선 전동차 판토그라프 주습판 마모 현상

4.1 다이나모 시험 마모현상

전차선은 4호선에서 설치운용 중인 것과 동일한 것으로 구성하고 주습판과 고체윤활제는 4호선에서 운용중인 기존 주습판과 개선 주습판을 시험기에 맞추어 재가공하여 시험에 적용하였으며 시험조건은 주행속도 80[km/h] 정속운전 조건, 전류치 500[A] 정 전류를 인가 조건, 1,000[km] 연속주행 조건으로 건기조건과 우기조건으로 구분하여 시험을 실시하였고 우기조건을 충족시키기 위하여 물을 살포(약 10[cc/min])하면서 시험을 진행하였다. 시험 전 전차선의 두께를 측정하고 주습판과 고체윤활제의 두께 및 중량을 각각 측정하여 장착하고 시험을 진행하였다. 시험 후 전차선의 두께, 주습판과 고체윤활제의 두께 및 중량을 각각 측정하였다.

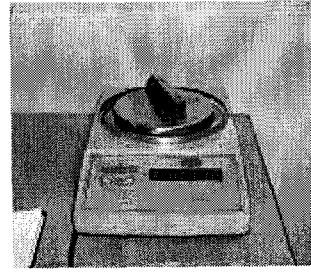
다이나모에서는 과마모 현상이 일부 관찰 되었지만 편마모 현상은 발생하지 않았다. 다이나모에서는 운행하는 전동차와는 달리 진동으로 인한 이선이 발생하지 않는 정하중 조건으로 시험이 진행되어 가장 큰 마모조건인 이선에 의한 인자가 배제되어 소재별 편차가 크게 나타나지 않았다.



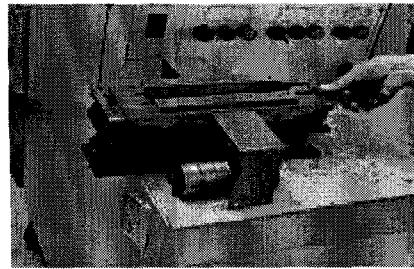
<그림4> 다이나모 전차선 측정



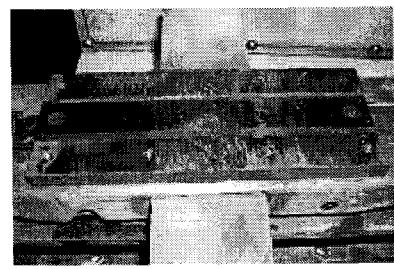
<그림5> 주습판 시험편 두께 측정



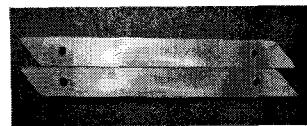
<그림6> 주습판 시험편 중량측정



<그림7> 시험 전 초기상태 주습판



<그림8> 시험 종료 후 주습판



<그림9> 전동차용 주습판

4.2 4호선 전동차 판토그라프 주습판 시험적용 마모현상

4호선에 적용한 개선 주습판은 2호선 지선구간(성수~신설, 5.4km)에서 1차 시험을 실시하여 개선품의 품질이 상대적으로 안정적인 것을 확인하였으나, 운행거리가 짧아 주습판이 마모되는 기간이 길어 시험기간이 과도하게 늘어나는 단점이 발생하여 효과적인 시험을 할 수 없었다. 1차 시험에서 기존 주습판보다 개선 주습판이 안정적으로 마모되는 것을 확인된 것을² 바탕으로 실질적인 시험데이터를 확보하기 위하여 동일편성(ADV 458편성)에서 유니트로 구분하여 개선품과 기존품을 혼합하여 구성한 후 마모정도를 측정하였다.

4058	◇◇	◇◇	◇◇	◇◇	◇◇	◇◇	◇◇	◇◇	4958
4158 (기존품)	4258 (기존품)	4358	4458 (개선품)	4558	4658	4758 (개선품)	4858 (개선품)		

<그림10> ADV 458편성 주습판 시험적용 구성

5. 마모측정

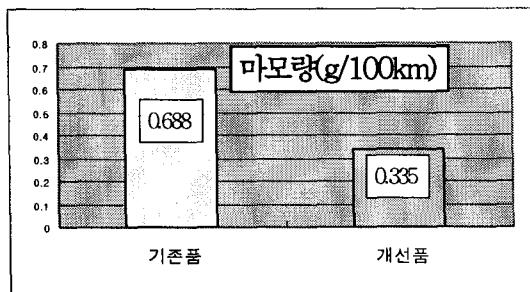
5.1 다이나모 시험

다이나모 시험은 총 12시간 동안 일정속도를 유지하며 운전한 후 주습판의 두께를 측정하고 무게를 측정하여 마모정도를 확인하였으며 전차선의 마모는 두께를 측정하여 마모정도를 확인하였다. 기존 주습판과 개선 주습판의 마모에서 압상력에 따라 마모정도의 차이가 발생하였고 압상력 조건이 5kgf 일 때와 비교하여 6kgf 조건에서 상대적으로 마모정도가 양호한 것을 알 수 있었다. 압상력에 의한 마모정도의 변화는 압상력 증가에 따라 접촉 안정성이 증대되어 접촉소음과 마모정도(약 2.5배 정도)가 상대적으로 양호하게 나타나는 것으로 현재 서울메트로에서 운용하고 있는 판토그라프 압상력은 6kgf를 유지하고 있어 전동차 도입 시 설계한 값의 타당성을 입증하였다.

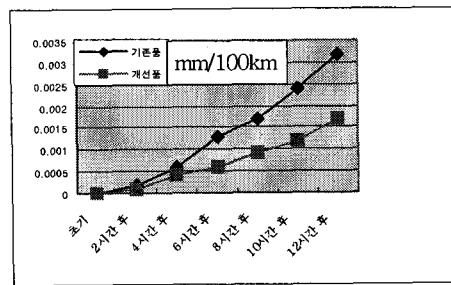
<표3> 압상력 변경에 따른 조건 별 주습판 마모량 (단위 : mm/1hr)

구분	기존품	개선품	소음	비고
5kgf	0.041	0.014	93.5[dB]	
6kgf	0.032	0.011	92.6[dB]	

또한, 주습판 마모량을 비교 하였을 때 <그림11>과 같이 상대적으로 기존 주습판의 마모량이 100km 당 약 2배 정도 많은 것을 알 수 있었으며 <그림12>에서 12시간 경과 후 전차선에서의 마모량을 비교하면 기존 주습판에 비하여 개선 주습판 일 때 전차선의 마모가 약 2배 정도 감소하는 것을 알 수 있었다.



<그림11> 주습판 마모량 비교



<그림12> 전차선 마모량 비교

5.2 4호선 전동차 시험

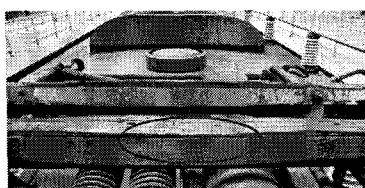
전동차 적용하여 운행 중인 기존 주습판은 우기에 급속도로 마모가 진행되는 과마모 현상과 부분적인 마모가 진행하여 계단(Step)형상이 되거나 전차선의 편위가 없는 직선 형상 전차선에서 나타나는 파임 형상으로 발전하여 전차선 단선, 전동차 판토그래프 집전판 조립체가 소손되는 사고로 나타나고 있으며 이를 예방하기 위하여 우기 시에는 겸수인원을 집중적으로 투입하여 예방정비를 진행하여 인적 비용이 증대되고 있으며 전동차 가용도가 감소하는 요인이 되고 있다.

4호선 전동차의 시험은 ADV 458 편성에 대하여 동일편성 내 기존 재질 습판체와 개선 재질 습판체를 구성하여 운행 후 마모정도를 측정하였다. 시험기간은 2007년 4월에서 현재까지 진행하고 있으며 운행구간과 예년과 달리 장마기간이 긴 결과로 두 재질의 마모정도가 확연하게 비교를 이루면서 나타난 것을 확인하였고, 같은 기간 전차선의 마모정도는 정상적으로 마모가 진행되고 특이한 사안이 발생하지 않았다.

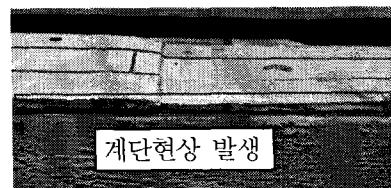
구 분	계	4월	5월	6월	7월	8월	9월
강수량(mm)	986.1	41.1	137.6	54.5	274.1	237.6	241.2

<그림14> 2007년 월별 강수량

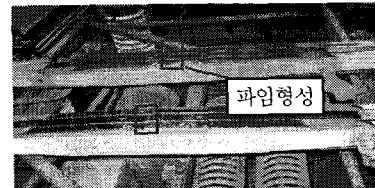
<그림15>는 기존 재질 주습판(4258호)의 마모 현상을 보여주는 것으로 전체적인 마모패턴이 평균적인 마모가 되지 않고 과마모 현상이 발생하여 편마모 현상으로 발전된 마모상태를 나타내고 있다.



<A> 이상마모 발생



 이상마모 확대

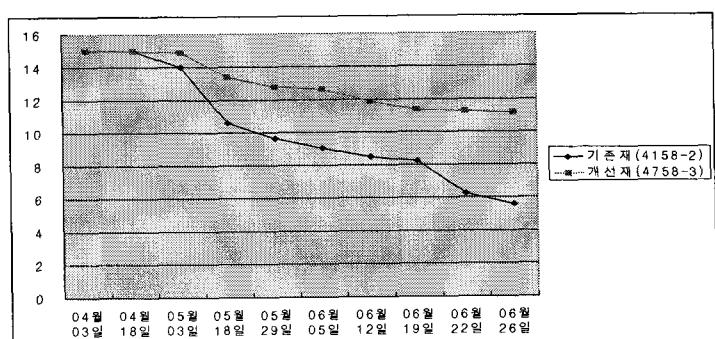


<C> 집전판 교환 후 초기 편마모 발생

<그림15> 기존 주습판 이상마모 현상

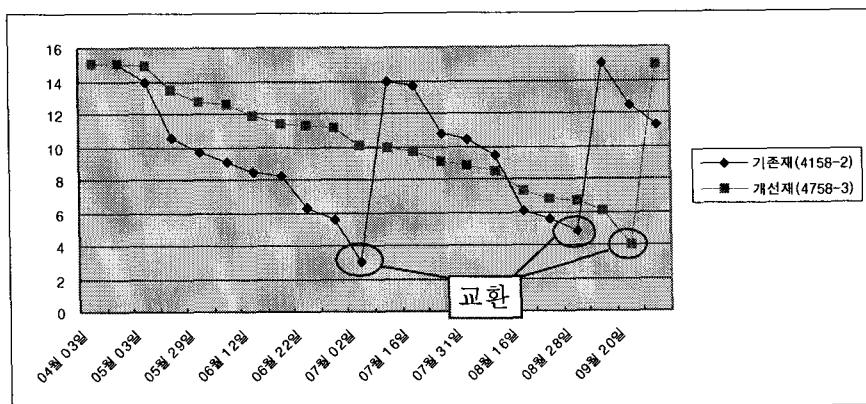


<그림16> 개선 주습판 정상마모



<그림17> 마모 정도 비교(4월~6월)

<그림17>에서 기존재와 개선재 모두 건기에는 정상적인 마모 형태를 가지는 것을 알 수 있고 비가 오는 시기에 기존재의 급격한 마모가 진행하고 6월에는 정상적인 마모형태를 가지는 것을 알 수 있으며 개선재는 별다른 영향을 받지 않고 마모가 진행하는 것을 알 수 있다.



<그림18> 기존 주습판, 개선 주습판 마모정도 비교

<그림18>에서 기존 주습판에 비하여 개선 주습판의 수명이 약 2배 정도 향상된 것을 알 수 있으며 주습판의 표면조도를 비교하면 <그림16>과 <그림15-C>에서 상대적으로 개선 주습판의 표면조도가 전체적으로 양호한 것을 알 수 있으며 표면조도는 전차선에 직접적으로 영향을 주는 인자이고 마모속도를 결정하는 중요한 요소로 작용하는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

4호선에 ADV 458 편성에 시험 적용한 개선 주습판은 건기와 우기에 관계없이 일정한 표면조도를 형성하며 과마모 현상이나 편마모 현상이 발생하지 않았으며 기존 주습판에 비하여 상대적으로 약 2배 정도 사용수명이 증가하는 것을 알 수 있었으며 다이나모 시험 결과 전차선의 영향도 상대적으로 약 2.5배 정도의 마모도 향상을 나타내는 것을 시험으로 알 수 있었다.

시험을 통하여 기존 주습판에 비하여 개선 주습판이 내아크성, 내우성, 윤활성 및 전기전도도가 우수한 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김선호, 1997, 철도시스템의 이해, 철도차량기술검정단
2. 김영규, 양용준, 원시태, 최경진, 2007, 전동차 판토그래프 주습판 마모현상 분석에 관한 연구, 철도학회
3. 김정수, 2007, 고속전철 가선계의 축소모델 개발에 관한 연구, 한국철도학회 제10권 제4호 2007년
4. 4호선 전동차정비지침서, 1994, 서울특별시 지하철공사
5. 오해원, 2002, 전동차 판토그래프 습판 마모의 측정분석에 관한 연구, 서울산업대학교
6. 정석주, Materials Technology for Technicians, 서울산업대학교