

전동차용 접지브러쉬 편중마모에 대한 해석
Analsis of Preponderant Wear of Earth Brush for
an Electrical Muultiple Units(EMUs)

박병섭*
Park, Byung Sup

구정서**
Ku, Jung Su

김길동***
Kim, Gil Dong

ABSTRACT

Earth brush for electrical multiple units(EMUs) is a device through which the current of the EMU load's consumed power fed from the DC 1,500V overhead line (or from the AC 25,000V catenary) flows via axle to the rail(ground) and which prevents the electric corrosion of the axle bearings by preventing the current flow to the axle bearings caused by electric potential from the magnetic field when the bearings rotate together with the earthing function when a thunderbolt falls or a surge comes. The earth brush wear rates among cars, however, shows quite differences when the earth brushes after being separated from the holders are measured with vernier callipers every 6 months of maintenance period.

Main causes of the earth brush wear are divided as mechanical, electric arc and electrical one, and the factors can be running speed, current, harmonics, connection state, spring tension, earth brush material, lubricant and so on, but only the earth brushes of the motor(M1) car show the highest wear rate and moreover maintenance difficulty occurs because of the wear rate differences among 3 earth brushes in one holder. The reason for these preponderant wear comes from the design concept of making preponderant current flow to some particular earth brushes and moreover the heat generated by the harmonics when the inverter starts to operate accelerate the wear. By defining these causes through experiments, I hope that the found results would be helpful for the future EMU design, safety, economy and maintenance.

1. 서 론

전동차용 접지브러쉬는 전동차가 주행하기 위해 강체 전차선으로부터 DC1,500V(카테나리 전차선 AC25,000V)의 전기를 공급받아 부하인 전동차에서 소비한 전력으로 인해 발생된 전류를 축상을 통해 레일(대지)로 흐르게 하고, 액슬(Axle) 베어링 회전시 자기장에 의한 전위로 베어링에 발생된 전류를 제거하여 전식현상을 예방하며, 또한, 낙뢰와 이상전류 유입시 접지기능을 하는 장치로 전동차 유지보수 업무를 위해 6개월 마다 홀더를 분해하여 접지브러쉬를 버니어캘리퍼스로 측정 관리하고 있으나, 전동차 량당 마다 마모율이 상당한 차이를 보이고 있다.

* 서울특별시 도시철도공사, 대리, 정회원

** 서울산업대학교 철도차량시스템공학과 교수, 정회원

*** 철도기술연구원 팀장, 정회원

전동차용 접지브러쉬 마모에 영향을 주는 주요 요인으로 기계적, 아크, 전기적 마모로 구분하며, 그 인자로는 주행속도, 전류, 고조파, 접촉상태, 스프링 압력, 접지브러쉬 재질, 윤활제 등을 들 수 있으나, 유독 모터카(M1)에 설치된 접지브러쉬에서 가장 많은 마모율이 발생되고 있으며 또한, 홀더 내에 설치된 3개의 접지브러쉬도 서로 다른 마모율로 전동차 유지보수업무에 어려운 점이 발생하고 있다. 이는 전동차 설계시 일부 접지브러쉬에 편중되어 전류가 흐르도록 설계되어 편중마모가 발생한 것이고, 인버터 구동시 고조파 발생으로 인한 열 발생으로 마모를 가중 시켰다. 이러한 원인을 시험을 통해 규명하여 향후 전동차 설계 제작, 안전성, 경제성 및 유지보수업무에 하는데 도움이 되고자 한다.

2. 접지브러쉬 마모인자

2.1 마모의 구분

접지브러쉬의 마모의 구분은 기계적, 전기적, 아크에 의한 3가지 마모로 구분하여 정의하며 접지브러쉬의 마모량을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$W=W_m+ W_a+ W_e \quad (1)$$

여기서, W_m 기계적 마모량, W_a 아크 마모량, W_e 전기적 마모량

기계적 마모량 W_m 을 사용조건과 재료에 의해 결정된 계수, 스프링압력, 주행거리에 의하여 식으로 표시하면

$$W_m=KPL \quad (2)$$

K : 사용조건과 재료에 의해 결정된 계수

P : 스프링장력(Spring force)

L : 주행거리(Distance of running)

아크에 의한 마모량 W_a 를 아크의 손실률, 전류, 발생시간에 의하여 식으로 표시하면

$$W_a=RIT \quad (3)$$

R : 아크손실률(Consumption rate of arc)

I : 아크전류(Electric current of arc)

T : 아크발생시간(Duration time of arc)

전기적 마모량 W_e 를 스프링장력, 재료에 의해 결정된 계수, 집전류, 와이어 이선율에 의하여 식으로 표시하면

$$W_e=PAI^{1.5}\eta/V \quad (4)$$

P : 스프링장력(Spring force)

A : 재료에 의해 결정되는 계수

I : 집전류(Collecting current)

η : 와이어 이선률(Rate of discontacting with wire)

V : 주행속도(Velocity)

2.2 마모인자의 영향

2.2.1주행속도(Velocity)

마찰속도가 증가하면 마찰계수는 감소하며, 마찰속도가 감소할수록 마찰계수가 증가한다. 기계적 마모는 마찰속도에 비례하나 전기적 마모는 마찰속도에 반비례한다.

(단, 마찰면에 윤활되었을 경우는 예외다)

2.2.2스프링 장력(Spring force)

스프링 장력이 증가할수록 기계적 마모량은 비례적으로 증가하나, 전기적 마모는 접촉 저항 감소로 마모량이 감소한다. 즉, 스프링 장력이 약 할수록 마찰손실은 줄일 수 있으나, 접촉면의 스파크로 인한 접촉저항 증가로 더 큰 손실을 일으키며, 스프링 장력이 크면 접지브러쉬의 접촉강화와 이에 따른 전기적 손실은 줄일 수 있으나, 더 큰 기계적 마찰에 의한 마모를 일으킨다. 그러나 전동차는 많은 진동이 발생되고, 윤활작용과 특수 처리된 접지브러쉬를 사용하기 때문에 스프링이 장력이 높은 것이 더 적합하다.

2.2.3전류의 영향

전류가 증가 할수록 마모량은 증가한다. 축상과 접지브러쉬가 접촉된 점에서 발생한 마찰열과 아크에 의해 생성된 열에 의해 접지브러쉬 소재가 열화되어 마모가 증가한다.

전류는 브러쉬의 모든 마찰면을 교차해서 일정하게 분배되지 않는다. 사실 전류는 몇 개의 비교적 매우 적은 표면 지역대를 통과해서 전달된다. 통과되는 구역은 시간에 따라 계속 변화하고 모든 상태가 양호하면 접촉면의 모든 부분에 동일하게 전달되기 위해 움직인다. 이 평형상태는 중단 될 수 있다. 브러쉬 표면상에 나타나는 나선의 줄은 전류 통과로 나타난 것이며 이것은 아래로 점점 집적된다. 그리고 과전류는 접지브러쉬의 급격한 마모 초래의 원인으로 안전사고를 유발하며 일부 전류는 축상 베어링으로 흘러 베어링 전식 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 전류밀도가 높은 재질을 사용하고 적정한 용량의 전류가 흐를 수 있도록 시스템 설계를 할 필요가 있다.

2.2.4축상과 접지브러쉬간 이선에 따른 영향

스프링 장력이 약하여 축상과 접지브러쉬 간에 이선이 발생되었을 때 접촉면에 접촉 저항이 발생하여 아크열이 증가하여 마모율을 증가 시킨다.

기타 인자로서 비가 오는 습기가 많은 날에는 전기적인 마모가 증가하며, 접지브러쉬 재질, 윤활제등에 따라 마모율이 달라진다.

3. 전동차용 접지브러쉬 메카니즘 분석

3.1 회로도 분석

그림 1과 같이 가선으로부터 전기를 공급받아 운전실(TC)에 설치된 보조전원장치와 모터카(M1,2)에 설치된 인버터장치의 소비전류가 모터카(M1)의 접지브러쉬를 통해서만 레일로 흐르도록 회로가 구성되어 모터카(M1)의 접지브러쉬가 상대적으로 마모가 높다.

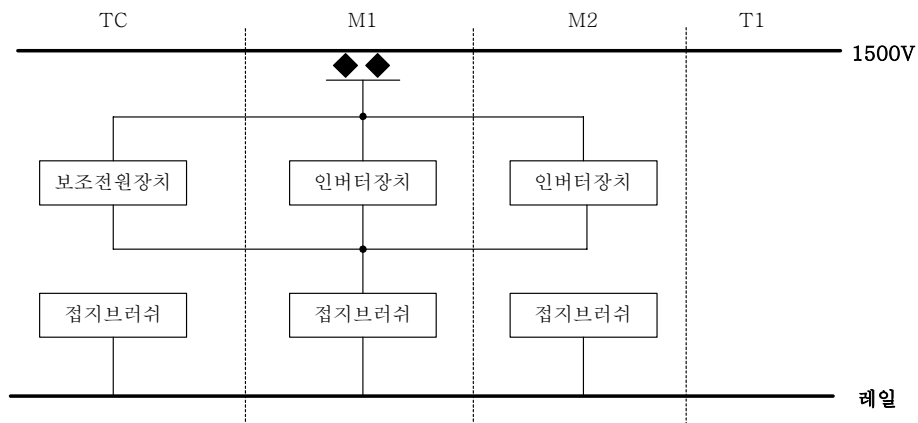


그림 1. 전동차 전기공급 회로도

3.2 전동차 정차시 부하변동에 따른 소비전류 측정시험

1년 동안 사용한 7호선 전동차 710편성에 대해 접지브러쉬 마모량을 측정하고 모터카(M1)가 가장 적게 마모된 개소에 비해 약 25배 정도 마모율이 높게 측정 되었으며, 또한 정차중 부하를 변동하여 전류를 측정하고 그림 2와 같이 모터카(M1)에서 많은 전류가 흐름이 측정 되었다.

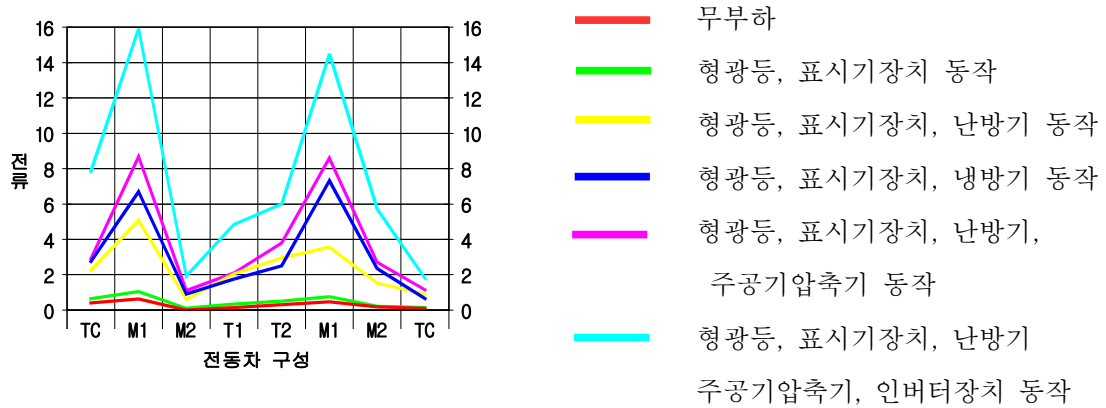


그림 2. 정차시 소비전류 측정

3.3 전동차 운행중 소비전류 측정시험

전동차 정차중 소비전류가 적은 운전실(TC)과 소비전류가 많은 모터카(M1)를 운행중 소비전류를 측정하고 결과 운전실(TC)는 거의 0A이고 모터카(M1)는 -250A~+250A로 상당히 많은 전류가 그림 3과 같이 측정 되었다

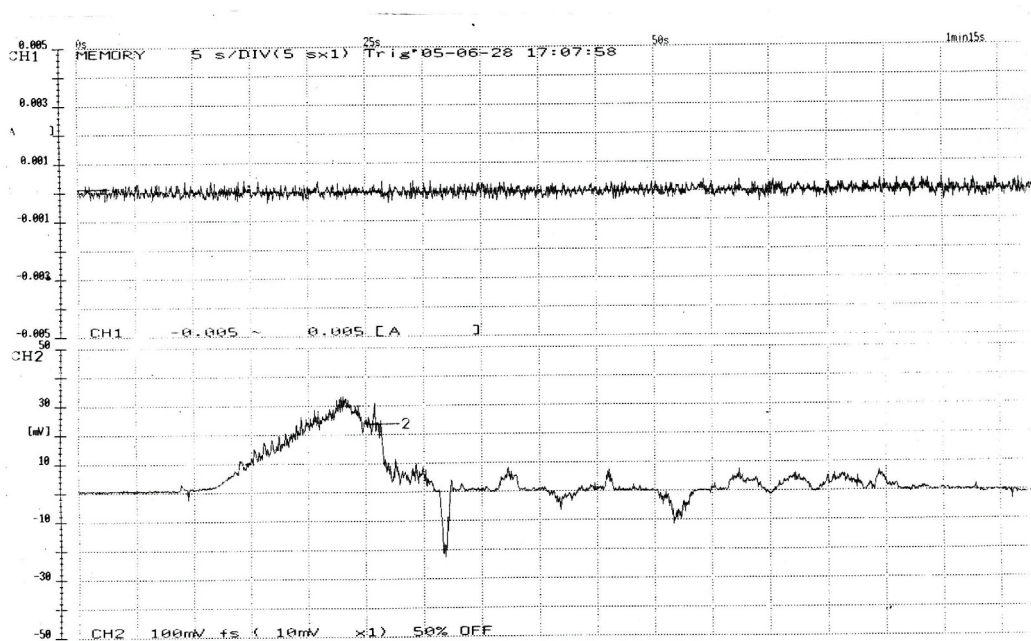


그림3. 운행중 소비전류 측정

4. 전동차용 접지브러쉬 마모실험 및 고찰

4.1. 전류, 스프링 변화에 대한 마모시험

5,7,8호선 전동차에 적용 사용중인 MC12의 재질로 그림 4와 같이 시편을 만들어 접지브러쉬 내마모 시험기에 장착하여 시험하였다. 시험조건은 시험기의 회전속도는 3,000rpm으로 1차적 시험은 스프링 장력을 고정시키고 전류(DC5A/cm²)를 입력하고, 48시간 가동후 마모 측정하였다. 2차적 시험은 1차 시험과 동일조건에서 전류(DC30A/cm²)만 변동하여 측정한 결과는 표 1과 같다.

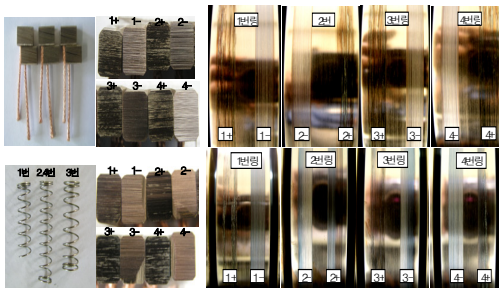


그림4. 접지브러쉬 시편 및 마모상태

표1. 전류,스프링 변화에 따른 시험결과

구분	스프링장력 (g/cm ²)	마모량(mm)		마모율
		5A	30A	
1	345	0.175	0.46	2.63배
2	372	0.255	0.47	1.85배
3	454	0.285	0.65	2.28배

전류가 증가할수록 축상과 접지브러쉬가 접촉된 점에서 발생한 마찰열과 아크에 의해 생성된 열에 의해 접지브러쉬 소재가 열화되어 마모가 증가한 것으로 공식(1) 전기적 마모량 $We=AI^{1.5}n/VP$ 에서 마모율은 전류 $I^{1.5}$ 에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

또한, 그림5와 같이 저전류(5A)에서는 전기적 마모 보다는 스프링 장력에 의한 기계적 마모가 영향을 주고 고전류(30A)에서는 일정한 스프링 장력까지는 전기적 마모가 그 이후부터는 기계적 마모와 전기적 마모가 합쳐져 마모의 큰 영향을 미치는 것으로 시험되었다.

4.2. 고조파에 의한 마모율 해석

고조파 발생 원인은 전력변환장치인 인버터가 스위칭 동작에 의해 출력과형에 기본파의 정수배가 되는 고조파 성분이 필수적으로 발생한다. 그 중 고조파 함유에 따른 열손실을 증명하고자 한다. THD(Total Harmonic Distortion) 지수를 사용하여 고조파 발생에 따른 열 손실 측면에서 고려하여 부하전압 V_1 이 n차 고조파까지를 함유한다고 가정하면 다음식 (1)과 같이 표현되며, 이를

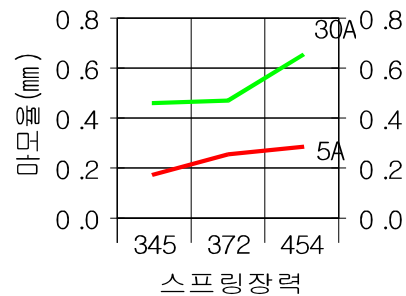


그림5. 스프링 장력과 마모율

이용하여 THD를 나타내면 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$I_l = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (1)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

선로에서 발생하는 열손실을 계산하기 위해 식 (2)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음 식(4)을 구할 수 있다.

$$P_{loss} = I_l^2 R \quad (3)$$

$$P_{loss} = (I_l)^2 \cdot R = (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)R = I_1^2(THD^2 + 1)R \quad (4)$$

고조파 증가시 열 손실은 증가하며 이로인해 온도가 상승되어 접지브러쉬 표면의 연화로 마모가 증가함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 향후 국내 중소도시에서 경량전철 도입 추진시 금회 연구한 자료가 조금이나마 도움이 되길 바라며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 접지브러쉬의 마모 인자로는 전류, 스프링장력, 고조파 등 여러 가지 요인이 있으나, 고전류가 흐를수록 접촉된 점에서 발생한 마찰열과 아크에 의해 생성된 열에 의해 접지브러쉬 소재가 열화 되어 마모가 상대적으로 증가함을 확인 하였다.

둘째, 저전류(5A)에서는 전기적마모 보다는 스프링 장력에 의한 기계적 마모가 영향을 주고 고전류(30A)에서는 일정한 스프링 장력까지는 전기적 마모가 그 이후부터는 기계적 마모와 전기적 마모가 합쳐져 마모가 급속도로 증가함을 확인 하였다.

셋째, 전력변환장치인 인버터가 스위칭 동작에 의해 출력파형에 기본파의 정수배가 되는 고조파 성분이 발생되면 열 손실 증가로 표면온도가 상승되어 접지브러쉬 표면의 연화로 마모가 증가함을 확인하였다.

넷째, 전동차 설계 제작시 접지브러쉬를 통해 레일로 흐르는 전류를 분산 설계하면 편중마모로 인한 안전사고 예방과 경제적 이득이 발생될 것이며, 향후 전력변환장치에서 발생하는 고조파 성분을 감소시키는 방안은 계속해서 연구해야 할 것이다.

참고문헌

1. 오해원, "전동차 판타그래프 스펙마모의 측정분석에 관한 연구", 철도기술대학원, 2002
2. 창상훈, "철도전력공급 안정화 연구", 철도기술연구원, 2001
3. Annette von Jouanne, "An Evaluation of Mitigation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Applications"