

도시철도차량 차륜마모 특성 및 유지보수기준에 관한 연구 a city railroad rolling-stock wheel wear and study about maintenance standard

박 수 중*
Park, Soo-Choong

지 용 현**
Ji yong-hyeon

김 은 실***
Kim eun sil

ABSTRACT

Many kinds of rolling-stocks that have various control methods are being operated by Seoulmetro which is a history of a city railroad rolling-stock. Seoulmetro is being faced with a wheel management comparing of other lines with a perpendicular wear of wheel and a side damage, and so on, by operating several cars at a loop line. This is causing maintenance expenses increase and deteriorating a fusibility of rolling-stock, for it has an effect on a rolling-stock using. A cutting pattern of wheel and a wear form affect the expected span of a wheel. A wheel cutting cause is classified into cutting for reprofiling of a flange wear of wheel and for removing every kind defect which originates from wheel wear. In this study, Seoulmetro exhibit a stable rolling-stock use method and a reasonable management method of wheel, analysing wheel exchange condition and cutting management of wheel.

1. 서론

서울Metro의 도시철도차량은 우리나라 도시철도 역사라 할 만큼 다양한 제어방식의 여러 차종이 운행되어지고 있다. 서울Metro는 순환선에 다양한 차종을 운영함에 따라 차륜의 직립마모, 답면손상 등의 발생으로 다른 노선에 비해 차륜관리에 어려움이 존재하고 있다. 이는 차량운용에 영향을 미쳐 차량의 가용성을 저하하고 차륜의 유지보수비용 증가를 유발하고 있다. 차륜의 수명은 차륜의 마모형태는 물론이고 차륜의 삭정패턴에 의해서도 좌우된다. 차륜삭정 원인을 크게 보면 차륜의 후랜지 마모에 의한 리프로파일링을 위한 삭정과, 단면찰상과 박리 등 차륜에 발생하는 각종 결함을 제거하기 위한 삭정의 두 종류로 나눌 수 있다. 본 연구는 서울Metro에서 운영중인 차량의 차륜삭정관리 및 차륜교환 현황 등을 분석하여, 차륜의 경제적인 관리방안과 안정적인 차량운용 방안을 제시하고자 한다.

본고는 차륜의 효과적 관리를 위하여 두 가지 측면에서 접근 하도록 하겠다. 하나는 리프로파일링 간격을 짧은 간격과 더 얇은 깊이로 삭정할 경우 차륜수명을 더 길게 할 수 있다는 방향과, 다른 하나는 계획삭정과 경제 삭정에 의한 차륜LCC향상방안의 측면이다.

* 박 수 중: 정회원, 서울Metro, 군자차량사무소기술팀

E-mail : hakusuing@hanmail.net

TEL : (02)6110-6406 FAX:(02)6110-6403

** 지 용 현: 비회원, 서울Metro, 검수팀

***김 은 실: 비회원, 서울Metro, 군자차량사무소정비팀

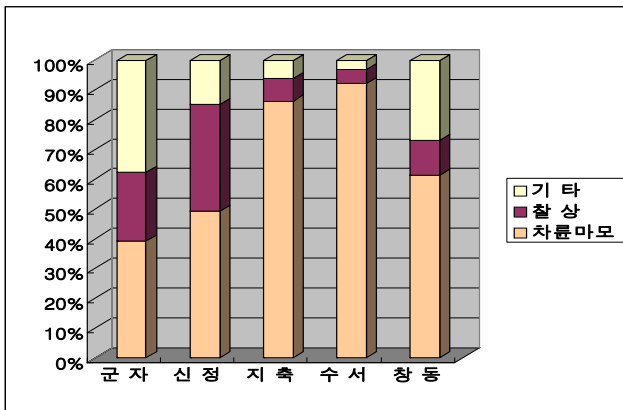
2. 서울메트로 차륜삭정원인 분석

차륜삭정원인의 파악은 차륜수명에 가장영향을 많이 주는 인자를 찾아내어 그 인자에 대한 대책을 수립 하도록 하는데 필수적이다. 다음의 자료는 2004년~2006년 사이의 서울메트로의 차륜삭정 현황을 나타낸 것으로 삭정원인별로 살펴보면 차량마모에 의한 것과 차륜답면의 찰상에 의한 삭정이 대부분을 차지하는 데, 이 중 차륜답면 찰상에 의한 삭정으로 점점 감소추세이다. 이는 차량제어기술의 향상으로 전기제동의 비중이 공기제동보다 훨씬 높아짐에 따라 전기제동에 의해 저속도까지 1차제동이 체결되고 이후 저속에서 공기제동이 체결됨에 따라 제동력 과다에 의한 차륜답면 손상이 적어지고 있기 때문이다. 또한 이에 의해 초퍼제어차량과 VVVF차량에서의 차륜마모 즉 차륜수직마모에 의한 삭정 비중이 높음을 알 수 있다.

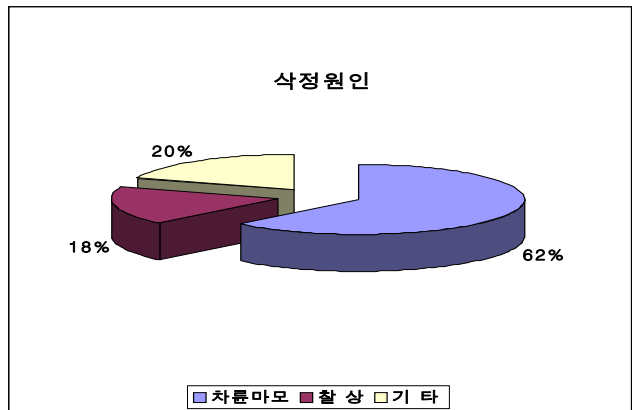
차륜후렌지 마모에 의한 삭정이 가장 많다는 것을 알 수 있는데, 이는 차륜의 직립마모가 원인이다. 차륜에 직립마모가 발생하게 되면 안전을 위하여 후렌지 보상을 하기위한 리프로파일링을 위한 삭정이 이루어지게 되는데 이때 후렌지 1mm를 보상하는데 4~5mm의 직경이 삭정되게된다. 또한 안전 규정에 따라 동일 축·동일 대차·동일 유니트에 대한 차륜직경 규정에 따라 다른 차륜까지 삭정이 이루어지기 때문이다. 차륜수명에 가장 영향을 주는 원인은 차륜수직마모인 것을 알 수 있다.

구분	원인별	계	군자	신정	지축	수서	창동
2004	계	3,050	962	457	702	645	284
	차륜마모	1,864	505	202	580	553	24
	찰상	686	272	172	74	83	85
	기타	500	185	83	48	9	175
2005	계	3,578	1,035	878	434	730	501
	차륜마모	2,324	582	408	356	644	334
	찰상	732	302	335	42	23	30
	기타	522	151	135	36	63	137
2006	계	5,032	1,060	1,032	1,179	1,124	637
	차륜마모	3,788	548	555	1,062	1,103	520
	찰상	852	384	344	57	17	50
	기타	402	128	133	60	4	77

〈 표 1 〉 차륜삭정 현황(단위 : 축)



〈 그림 1 〉 차량기지별 삭정원인

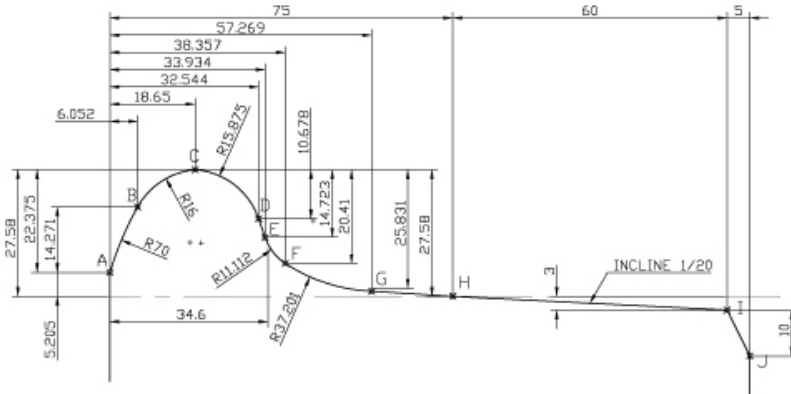


〈 그림 2 〉 삭정원인별 분포

기지별 차륜삭정원인을 살펴보면 군자와 신정차량기지에서 찰상에 의한 삭정이 많은 것으로 나타나는데 이는 이들 기지에서 운영되는 구형차량인 저항제어차량의 제어특성에 의해 발전제동이나 회생제동에 의한 전기제동보다도 공기에 의한 기계적제동이 크게 작용하여 제동력과다에 의한 찰상이 많이 발생되기 때문이다. 군자차량기지의 기타비중이 많은 것은 다른 차종에서는 드물게 발생하는 차륜의 그루밍 현상이 1호선 VVVF차량에서 많이 발생되기 때문이다. 같은 호선을 운행하는 저항제어차량에서는 그루밍 현상이 거의 나타나지 않고 있으며, 다른 호선에 운행되고 있는 VVVF차량에서도 그루밍 현상이 나타나지 않는 것으로 보아 도시철도차량으로는 비교적 고속으로 운행되고 있는 1호선의 특수성과 VVVF차량의 동특성이 서로 작용하여 발생하는 것으로 추측하고 있으며 정확한 원인은 좀더 연구를 통해 규명되어야 할 것이다.

3. 차륜측정데이터 및 삭제데이터분석

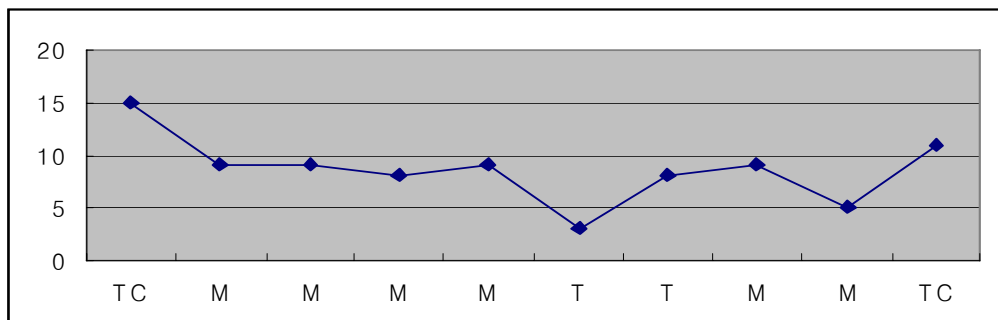
위 차륜삭정 원인 분석을 통해 서울메트로의 차륜 수명에 가장 많은 영향을 끼치는 것이 차륜의 수직 마모라는 것을 알 수 있었다. 차륜의 수직마모대책으로는 1994년 차량기지에 방향전환선이 설치되었으며, 곡선구간 레일에 도유기가 설치되었다. 또한 차륜프로파일을 1/20구배와 1/10구배를 가지고 있는 2단 구배 차륜답면에서, 후렌지마모가 적게 발생하는, 즉 곡선 운행에 적합한 1단 구배 프로파일인 휴먼프로파일로 90년대 후반에 교체되었다. 단 도시철도수준에서 고속운전이 되고 있는 1호선 차량은 휴먼프로파일의 동특성이 좋지 못하여 2단 구배 프로파일이 사용되어지고 있다. 이밖에 일부차량에 교체 도유기가 시험취부운행 되기도 하였으며, 2호선 신조차량에는 액체도유기가 장착되어 있다. 차륜의 데이터분석을 통해 이들 대책의 성과 및 한계점을 밝히고 이에 대한 대책을 찾아보겠다.



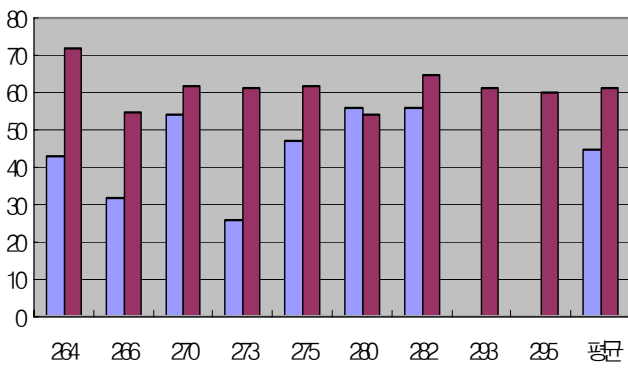
〈 그림 3 〉 휴먼프로파일

3-1 방향전환선과 프로파일 변경에 의한 효과 및 한계

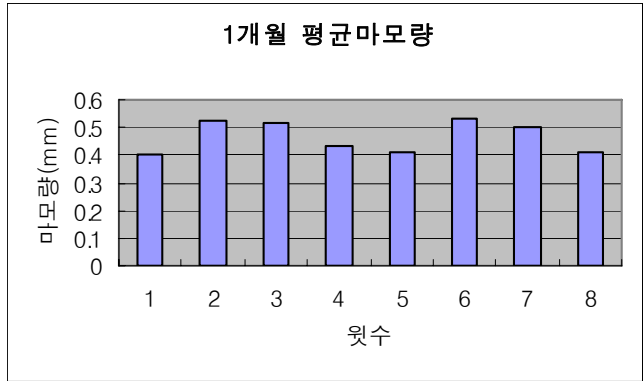
차륜의 수직 마모는 철도차량의 특성상 대차에 윤축이 견고하게 고정되어 있기 때문에 곡선구간 통과 시 윤축은 접선방향으로 완전한 직각을 이루지 못하고 공격각을 가지게 된다. 이로 인해 곡선구간 통과 시 레일과 후렌지 접촉이 커져 차륜 및 레일이 마모가 진행되는 것이다. 수직마모대책의 한 가지가 방향전환선의 설치이다. 방향전환선의 설치는 근본적 대책 이라기보다는 완화 대책으로 볼 수 있다. 차량이 한 방향으로만 운행하게 되면 특정차호 선두차 그리고 특정 위수에서 차륜의 수직마모가 집중적으로 발생하게 되는데 이는 곡선구간 통과 시 선두차가 차량을 선도하마에 따라 외측차륜에 공격각에 의해 레일과의 마찰력이 커지게 되기 때문이며 후부차량은 선도차에 의해 이끌려가는 형식이 되어 그 영향이 적게 나타나지만 곡선구간 통과 시 외측차륜에 해당하는 차륜이 마모가 더 심하게 된다. 이에 따라 특정차호 특정위수 차륜의 수직마모로 인해 다른 차륜도 안전기준에 의해 보상 삭정이 진행되어 차륜의 낭비를 가져오게 되는데 그 대책이 방향전환선의 설치로 한쪽이 편중되어 마모되는 현상을 분산할 수 있는 것이다. 서울메트로로는 3호선 94년, 2호선 97년에 방향전환선을 지축차량기지와 군자차량기지에 설치 사용하였다. 방향전환선 보다 좀더 적극적인 대책은 차륜 답면형상을 바꾸는 것으로 앞에서 언급한 것처럼 서울메트로로는 휴먼타입의 프로파일로의 전환이 98년부터 이루어졌다.



〈 그림 4 〉 3호선 차호별 부분차륜교환량



〈 그림 5 〉 차륜의 사용 주기 비교

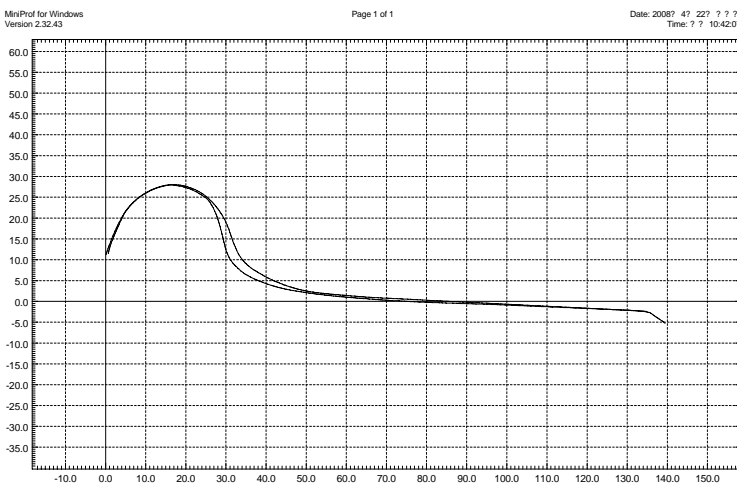


〈 그림 6 〉 위수별 차륜 후렌지 평균 마모량

그림4는 1990년~2006년 사이의 3호선 운행차량 중 선정된 20개편성의 부분차륜교환데이터이다. 부분차륜교환은 차륜교환이 량 단위로 이루어진 것이 아니라 축 단위 또는 차륜 단위로 이루어지는 것으로 부분교환이 많다는 것은 특정 차륜의 수명이 짧았다는 것을 의미 하는 것이다. 선두차의 부분차륜교환 횟수가 많은 것은 앞서 설명한대로 선두차에서의 공격각의 영향 크기 때문이다. 그림5는 2호선 9개편성에 대한 차량도입부터 2006년까지의 차륜교환 실적을 분석하여 차륜수명을 나타낸 것으로 방향전환선과 차륜프로파일 변경을 반영하기위해 1997년을 기준으로 하여 전후를 비교한 것으로 차륜수명기간이 연장되었음을 보여주고 있다. 그림6은 99년~2002년까지의 2호선 운행차량 중 군자차량사무소의 초과제어 차량의 차륜측정 데이터와 차륜삭정 데이터를 분석한 것으로 방향전환선에 의해 특정위수 2,6위의 수직마모편중이 3,7위의 수직마모로 분산되었음을 알 수 있으나 다른 위수에 비해 월평균 마모량이 많음을 알 수 있어 방향전환선에 의한 효과는 어느 정도의 한계가 존재함을 알 수 있다.

3-2 차륜의 효과적 관리 방안

차륜의 효과적 관리를 위하여 두 가지 측면에서 접근 했다. 하나는 리프로파일링 간격을 짧은 간격과 더 얇은 깊이로 삭정할 경우 차륜수명을 더 길게 할 수 있다는 방향과, 다른 하나는 계획삭정과 경제삭정에 의한 차륜LCC 향상방안의 측면이다. 이를 위해 미니프로브를 활용한 답면 모사를 통해 차륜의 마모형태를 알아보았다. 또한 차륜측정데이터와 삭정데이터에 대하여 후렌지 수직마모 관점에서 분석하였으며, 주행거리에 따른 차륜의 직경변화 및 후렌지변화를 살펴보았다.

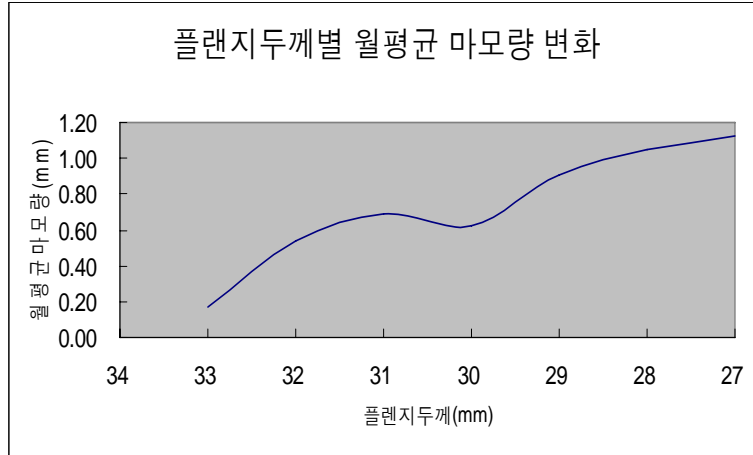


〈 그림 7 〉 후렌지 마모형태

그림7은 차륜의 마모를 미니프로브를 이용하여 차륜교환 후 첫 번째 삭정이 이루어진 차륜과 마모가 일정 진행된 차륜을 겹쳐 비교해 본 것이다. 이를 살펴보면 차륜답면는 거의 일치 되고 있는 것을 알 수 있는데 이는 차륜의 답면의 마모가 차륜의 원형 프로파일 형태로 마모가 진행되어 1/20답면구배를 유지하고 있음을 알 수 있다. 후렌지마모의 경우 프로파일 형태에서 조금 벗어나 마모되면서 후렌지 각 역시 조금 변화 되는 것을 알 수 있다. 즉 수직마모가 진행되고 있다는 것을 알 수 있는데 이것이 계속 진행 될 경우 차륜의 리프로파일링 삭정을 통해 원형의 프로파일 형태를 유지 할 수 있도록 해야 한다. 삭정원인 분석에서도 삭정원인 중 가장 큰원인이 차륜의 후렌지 마모였음을 알 수 있었는데 답면 모사결과 역시 차륜후렌지의 수직마모를 나타내어주고 있다.

플랜지두께 구분	34	33	32	31	30	29	28	27
두께1mm당 사용일	113	176	55	43	48	33	29	27
1달평균두께마모량		0.171	0.543	0.691	0.620	0.909	1.050	1.128

〈 표 2 〉 후렌지 두께변화에 대한 마모량과 후렌지사용기간



〈 그림 8 〉 차륜 후렌지두께에 따른 월평균 마모량

그림8과 표2와 표3은 1999년 부터2003년까지의 2호선 차륜측정 및 삭정데이터를 분석한 것이다. 그림8은 차륜 후렌지두께에 따른 1달 평균 마모량을 나타낸 것으로 후렌지두께가 감소할수록 차륜의 후렌지 마모량은 증가함을 알 수 있다. 34mm에서의 두께감소량이 아주 작은 것은 보여주는데 이는 휴면프로파일 특성인 플랜지 도입부의 두께가 보강되어있고 차륜두께측정위치가 그 위 지점에서 측정되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 후렌지두께 30mm지점에서의 마모량이 오히려 31mm때보다 약간 감소한다는 것을 알 수 있는데 이것 역시 프로파일 특성에 기인한 것이라 사료된다. 표2에 나타는 것과 같이 차륜 두께당 사용일수도 같은 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 차륜의 관리는 차륜후렌지두께를 30mm이상으로 관리 하는 것이 차륜 후렌지 마모량을 적게하여 유리하다는 것을 알 수 있다.

삭정변위	33~34	32~34	32~33	31~33	31~32	30~32	29~30
평균삭정량	5.2	4.5	4.5	3.5	4.3	4.5	4

〈 표 3 〉 후렌지 변위에 따른 단면삭정량

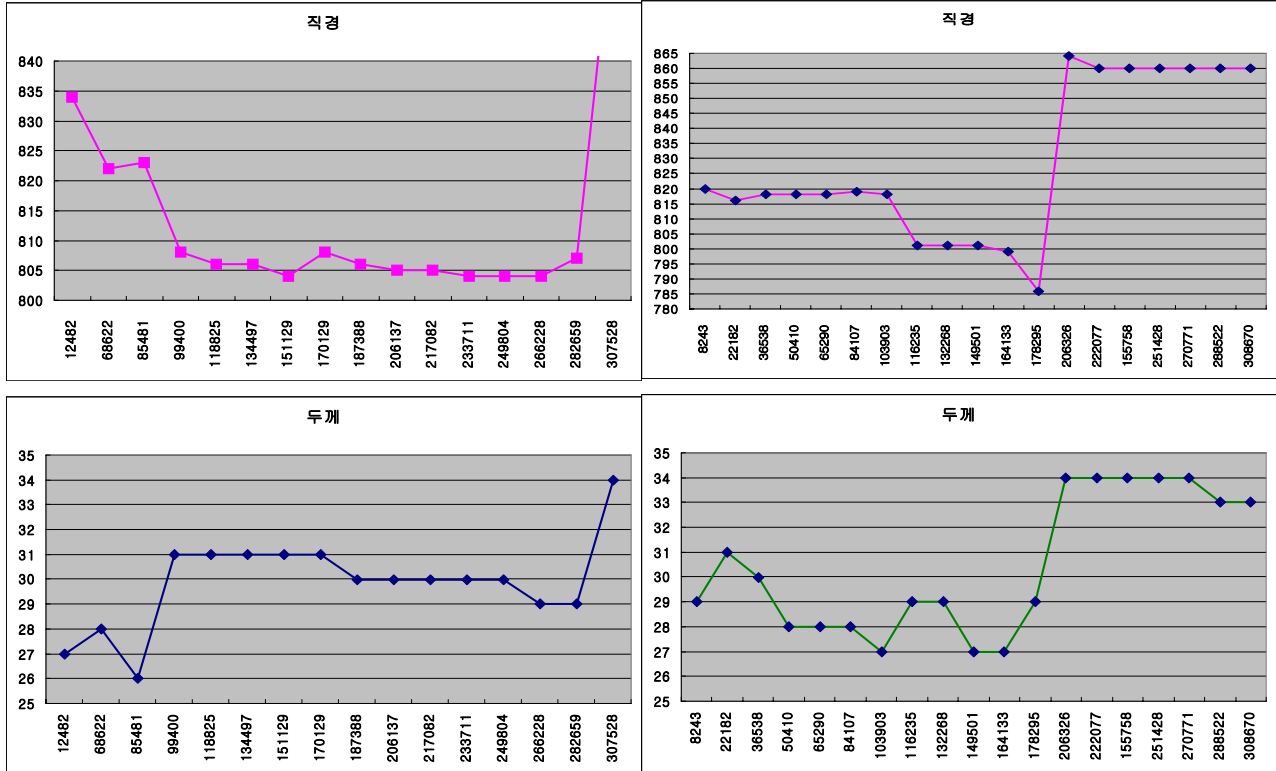
표3은 차륜의 리프로파일링의 삭정시 차륜두께 변위에 따른 차륜직경의 보상량을 나타낸 것으로 33~34mm로삭정 시 보상량이 제일 크며 그 이유는 후렌지에서 차륜단면에 이르는 구간의 프로파일 보상을 위한 것으로 사료되며, 31~33mm로 삭정시 차륜단면삭정량이 작음을 알 수 있는데 이 역시 프로파일 특성에 기인한 것으로 사료된다.

위자료를 종합해보면 리프로파일링 간격을 짧은 간격과 더 얇은 깊이로 삭정할 경우 차륜후렌지 두께를 두껍게 가져갈 수 있고 이에 따라 후렌지 마모량도 작아져 결과적으로 차륜의 수명도 길어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 차륜운용 측면을 생각한다면 리프로파일링 주기를 짧게 가져가는 것에는 한계가 있다.그럴 경우 차륜삭정 때문에 차량의 영업운전 시간이 줄어들 수 있기 때문이다.

그림9와 그림10은 차륜삭정관리데이터의 예로 후렌지마모가 가장심한 선두차 2위 차륜의 삭정 및 측정데이터로 차량의 운행거리에 따른 차륜직경 및 후렌지 두께와의 관계를 나타낸 것이다. 객관적인 두 자료의 비교를 위하여 차륜직경이 비슷한 차량을 대상으로 했으며, 이는 차륜 직경이 작을수록 차륜직경 및 차륜의 후렌지마모가 증가되기 때문이다. 차륜직경이 작을수록 같은 거리를 진행할 때 많은 회전을 해야 하기 때문에 그 만큼 레일과 많이 접촉되어 마모가 빨리 진행된다.

그림9와 그림10을 살펴보면 차륜후렌지 두께관리를 30mm이하가 되도록 하여 리프로파일링 과정에서 차륜단면의 낭비가 심했음을 알 수 있는데, 그림9의 경우 후렌지두께를 31mm로 삭정하면서 차륜직경에 대한 낭비가 발생하였으나, 31mm이상으로 차륜후렌지두께를 가져감에 차륜후렌지 마모량의 적어지게 되어 차륜

사용이 그림10의 후렌지두께를 28mm로 보상한 경우에 비해 길어 졌음을 알 수 있다. 그러나 후렌지 두께 30mm이전에 삭정이 이루어졌다면 더욱더 좋은 결과가 있었을 것이다. 차륜후렌지두께를 30mm이상으로 유지할 경우 검수에서의 삭정 낭비뿐만이 아니라 중정비 과정에서의 차륜원형 삭정시에도 차륜담면에 대한 낭비를 적게 할 수 있다.



< 그림 9 > 차륜삭정관리 예 417편성

< 그림 10 > 차륜삭정관리 예 424편성

차륜삭정관리의 두가지 대안을 생각해 볼 수 있다. 하나는 차륜후렌지 두께를 30mm이상으로 관리하기위해 계획삭정을 도입하는 것으로 기존의 저항제어차량과 초과제어차량의 경우 2Y,4Y이므로 1년에 한번 계획삭정을 도입하고 VVVF차량의 경우 3Y,6Y이므로 1년 6개월에 한번 계획삭정을 도입하는 방법이다. 다른 한 가지 방법은 후렌지마모가 적으면서 안전에 문제가 없는 30mm이하의 새로운 프로파일을 만들어 경제삭정을 도입하는 방법이다. 두 가지 방법 모두 효과적인 방법으로 계획삭정을 통해 차륜의 후렌지두께를 30mm이상으로 관리하고 차륜의 이상마모에 의해 차륜후렌지두께가 급격히 감소할 경우 경제삭정에 의해 30mm이하의 삭정을 통해 차륜담면 보상에 의한 차륜낭비를 주려 차륜수명연장에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.



< 그림 11 > 차륜후렌지의 이상 과 마모현상

4. 결론

서울metro차륜 수명에 가장 큰 영향을 주는 인자는 차륜후렌지의 마모이며 이에 대한 1990년대부터 적용된 방향전환선의 도입 및 차륜프로파일 변경 등으로 인하여 차륜수명연장에 상당한 성과를 가져왔다. 또한 차륜의 삭정관리를 후렌지 두께30mm 이상으로 관리하여 리프로파이일링 간격을 짧은 간격과 더 얇은 깊이로 삭정할 경우 차륜후렌지 두께를 두껍게 가져갈 수 있을 뿐만 아니라 후렌지마모량도 작아져 결과적으로 차륜의 수명도 길어진다는 것을 알 수 있었다. 이를 위해 차륜의 계획삭정 및 경제삭정이 도입되어야 한다. 향후연구 과제로는 각 호선에 맞는 차륜답면 및 경제답면의 개발과 차륜수직마모를 근본적으로 완화 할 수 있는 고체윤활기술과 같은 방면의 연구가 되어져야 한다. 더불어 레일마모에 관한연구도 병행 되어야 할 것이다.

※참고문헌

1. rolling stock & machinery 2005.12 vol.13 No.12
2. International Railway Journal, September, 2007
3. "서울 메트로 2.3호선 루프선 사용 전후의 전동차 차륜교환분석" 김동민 안종곤" 저 한국철도학회:학술대회지 , 한국철도학회 07 추계학술대회 논문집 , pp.35-50 , 2007
4. 차륜/레일 시스템 인터페이스한국철도학회지" 이희성" 저 , 1229-1102 , 제8권3호 , pp.40-44 , 2005
5. 경부고속열차의 기존선 주행시 차륜마멸특성에 관한 연구" 강부경 이희성" 저 한국철도학회:학술대회지 , 한국철도학회 00년도 춘계학술대회논문집 , pp.135-142 , 2000
6. 2호선 차륜마모예측 및 유지보수 기준연구" 이명일 박수중" 저 서울메트로차량분야 연구발표 2003