

# 전동차 차륜 답면의 마모 및 결함에 대한 사례연구

## The case study of wear and defects on the wheel tread for Metro

이남진\*, 김정하\*, 김철근\*, 김진태\*

Nam-Jin Lee, Jung-Ha Kim, Chul-Gun Kim, Jin-Tae Kim

---

### ABSTRACT

The wear and defects on the wheel tread are caused by the interface between wheel and rail, the suspension system on bogie, the track condition and etc, which are interacted with complex mechanism. Because of the difficulty of analysis of wheel and rail interaction, the measuring data are necessary for improvement of wheel design and maintenance of train.

On this case study, the pattern of wheel wears and defects are presented and lifetime of wheel and the reprofiling period are estimated on a basis of the measured results.

---

## 1. 서론

철도 차량 거동의 시작점이 되는 차륜과 선로간 접촉면의 작용은 상호간의 기하학적 답면 형상, 재질, 차량 현가장치 특성, 선로 건설 및 유지 보수 조건, 기후 등 여러 가지 복합적 메커니즘으로 작용된다. 따라서, 이러한 복합적 작용을 명확히 분석하여 모의시험을 통해 차륜수명 및 거동을 예측하기에는 한계가 있다. 이러한 이유로 차륜에 대한 설계 및 유지 보수 등의 영역에서 경험 및 시험자료에 많은 부분을 의존하며, 설계 및 관리 기술의 향상을 위해 이들 자료들에 대한 체계적인 조사가 요구된다.

이러한 요구에 본 연구에서는 상업운행중인 전동차의 차륜 답면을 주기적으로 측정된 자료를 바탕으로, 운행거리 경과에 따른 차륜 마모율의 추이, 차량 조건에 따른 차륜 마모량, 차륜 답면 결함을 분석하여, 향후 차륜 설계 및 차륜 유지보수, 차륜 수명을 예측하고자 한다.

## 2. 측정 및 대상 차량

### 2.1 차량 일반 사양

본 연구에서 측정한 차량은 2002년 중순 납품을 시작하여, 약 4개월간의 시험 운행 후 2002년 12월부터 상업운행 중에 있으며, 차량의 기본 사양은 표 1과 같다.

---

\* ㈜로템 주행장치개발팀, 비회원

표 1 관측 전동차 기본 사양

항 목	사 양	비 고
축중	17 ton	만차기준
최고 속도	90 km/h	상업속도: 80 km/h
최대 감속도	1.3 m/s <sup>2</sup>	비상제동시
Rail gauge	1676 mm	광궤
Rail spec.	Profile : UIC 861-3	그림 2참조
Wheel profile	현지 적용 profile	그림 3참조, 1/20
Wheel material	IRS-R-19/93, Part4	HB: 310기준
Wheel Dia.	860/780	
제동방식	답면 제동/회생제동	

위 전동차(EMU: electrical multiple unit)의 구성은 추진력을 갖는 동력차 (M-car)와 운전실이 장착된 부수차(DT)로 각각 2량씩, DT-M-M-DT의 순으로 4량 1편성으로 되어있다. 각 차륜의 명칭과 상기 차량 편성에 대한 개략도는 그림 1과 같다.

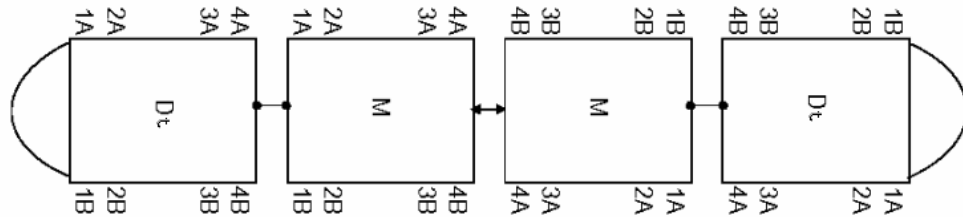


그림 1 차량 편성 및 차륜 개략도

이 차량의 제동방식은 회생제동과 답면제동을 사용하고 있으며, 제동 전자제어장치의 제동블렌딩 기능을 이용해 회생제동을 우선 적용하여, 답면제동 사용을 최소화하는 방식을 채택하고 있다.

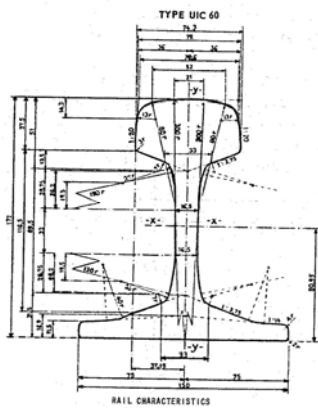


그림 2 레일 profile

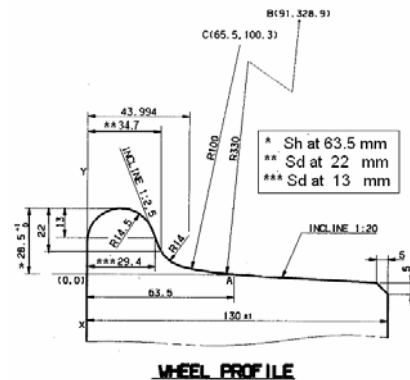


그림 3. 차륜 profile

## 2.2 차륜과 선로 답면 특성

관측 차량에 적용된 차륜과 선로의 profile은 그림2,3와 같으며, 차륜과 선로 형상의 상호적합성과 차량의 거동을 예측할 수 있는 차륜과 선로의 상호 접촉면 선도와 윤축의 좌우변위에 대한 차륜 접촉 반지름 선도(radius of rolling circle)는 그림 4,5와 같다. 두 선도로 본 차량은 0.18의 등가구배(conicity)를 가지며, 사행동 파장은 8.8m이며, 선로와 차륜간의 접촉면은 비교적 균일한 분포를 가지고 있음을 알 수 있다.

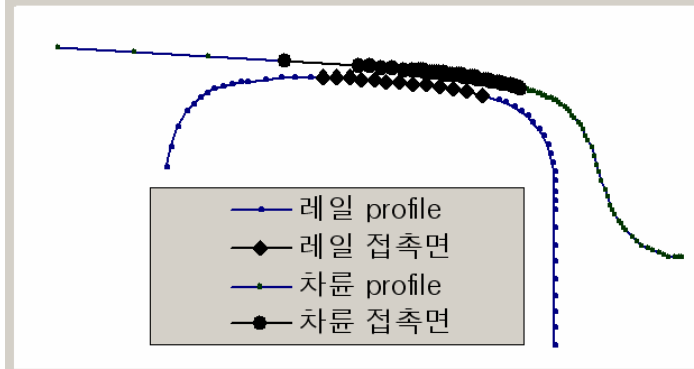


그림 4. 차륜 레일간 접촉면

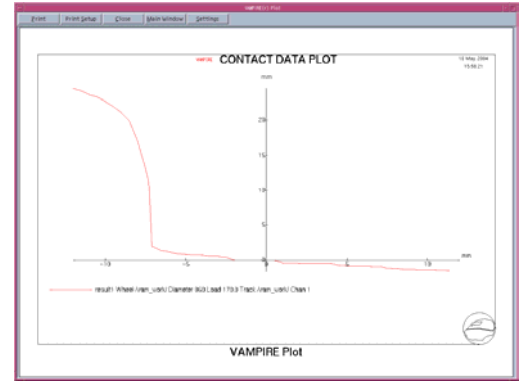


그림 5. 좌우변위에 대한 차륜접촉반경

## 3 차륜 마모 현상에 대한 조사

### 3.1 운행 거리 경과에 따른 차륜 마모

제1편성의 답면을 정기적으로 측정하였으며, 차륜의 삭정 판단 기준에 해당하는 내측면에서 63.5mm 부위의 깊이(Sh at 63.5)와, 플랜지 끝단에서 13mm, 22mm 부분의 플랜지 두께(Sd at 13, Sd at 22)를 아래 표 2와 같이 정리하였다. 표 2의 수치가 의미하는 바는 차량 주행거리 10만km 당 마모율로 표현하였다. (차륜 부위의 상세 위치는 그림2를 참조)

표 2 운행거리별 차륜 마모량

주행거리 [km]	Sh at 63.5mm	Sd at 13 mm	Sd at 22 mm	Tread Wear at Sh 63.5	Flange Wear at SD13	Flange Wear at SD22
13117	29.411	29.329	34.075	0.911	0.071	0.625
32951	29.284	29.283	33.726	0.784	0.117	0.974
64251	29.639	29.208	33.456	1.139	0.192	1.244
73535	29.830	29.203	33.345	1.330	0.197	1.355
89506	30.047	29.180	33.169	1.547	0.220	1.531
96223	30.141	29.168	33.087	1.641	0.232	1.613
107021	30.081	29.118	33.084	1.581	0.282	1.617
115496	30.186	29.043	32.879	1.686	0.357	1.821

(단위 : mm/10만km)

주행거리별 차륜 마모율은 초기 4만km까지 급속히 발생하고, 그 이후 마모율이 감소하는 것을 알 수 있다. 일정 주행 이후 마모율의 현저하게 감소하는 점으로 볼 때, 이 때의 답면 형상

은 정상상태에 이른 것으로 판단되며, 이 답변형상을 신조 차륜 형상에 반영하여 차륜수명 연장 방안을 선로 형상 안정화와 함께 검토해 볼 가치가 있다.

그림 6은 표2를 기준 주행거리당 마모율로 치환하여 주행거리별로 도식화 한 것으로 마모율이 주행거리가 증가함에 따라 안정화되는 것과 세가지 측정부위 중 답변의 마모율이 가장 높은 것을 알 수 있다.

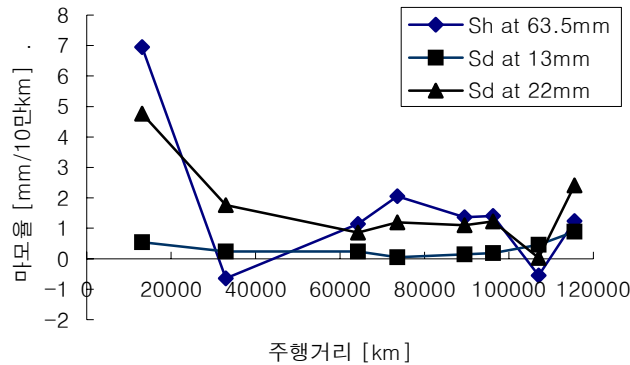


그림 6 주행거리별 마모율 변화선도

### 3.2 차륜 조건에 따른 차륜 마모

차륜의 마모를 차륜 축의 위치, 차륜에 제동장치의 종류, 순환 선로등의 좌우 비대칭 선로등에 따라 그 나타나는 성향을 알아 보기위해 주행거리 115,496km된 차량의 마모량을 비교해 보았다. 그 결과는 표3 과 같다.

표 3 차륜 위치별 차륜마모 비교

한 편성 차량의 차륜은 모두 동일 주행거리와 동일 선로조건에서 일정기간 사용되었으나, 표 3과 같이 상당한 차이를 보인다. 이러한 차이의 원인은 여러가지 근거로 설명이 가능하나, 그 중 주요한 몇가지 요인에 대해 조사하고, 그 영향에 대한 마모 정도의 차이를 조사하였다.

#### 1) 제동장치에 따른 영향

기초제동장치로 답변제동장치만 장착된 Dt-car와 달리 M-car는 회생제동을 병행해 사용하기 때문에 M-car와 DT-car의 답변제동 사용량

Car no.	Wheel no.	Date of measurement 13th Jan'04 (in mm)			Wheel wear b/w New wheel & 13th Jan'04 Readings (in mm)			Remarks
		Total Km Earned:			With respect to new wheel Sh at	With respect to new wheel Sd at	With respect to new wheel Sd at	
		115,496			63.5mm=28.50	13mm=29.40	22mm=34.738	
		Sh at 63.5mm	Sd at 13 mm	Sd at 22 mm	Tread Wear at Sh 63.5	Flange Wear at Sd 13	Flange Wear at Sd 22	
D101	1A	30.792	28.960	32.731	2.292	0.440	2.007	22.75
	1B	30.851	29.081	32.339	2.351	0.319	2.399	19.91
	2A	30.882	29.363	33.092	2.382	0.037	1.646	22.52
	2B	30.538	29.165	32.714	2.038	0.235	2.024	21.53
	3A	30.493	29.084	32.966	1.993	0.316	1.772	23.34
	3B	30.687	29.343	32.948	2.187	0.057	1.790	21.84
	4A	30.620	28.997	32.731	2.120	0.403	2.007	22.54
	4B	30.421	29.048	32.725	1.921	0.352	2.013	22.23
M101	1A	28.891	29.022	33.740	0.391	0.378	0.998	27.68
	1B	28.760	28.846	33.602	0.260	0.554	1.136	27.87
	2A	28.759	29.102	33.878	0.259	0.298	0.860	27.97
	2B	28.850	28.983	33.873	0.350	0.417	1.065	27.54
	3A	29.976	29.059	33.101	1.476	0.341	1.637	24.20
	3B	30.051	29.166	32.897	1.551	0.234	1.841	22.53
	4A	30.092	28.803	32.736	1.592	0.597	2.002	23.62
	4B	29.950	28.713	32.385	1.450	0.687	2.353	22.21
M102	1A	30.082	28.922	32.661	1.582	0.478	2.077	22.57
	1B	30.317	28.683	32.350	1.817	0.717	2.388	22.18
	2A	30.162	29.268	33.241	1.662	0.132	1.497	23.83
	2B	30.127	28.960	32.737	1.627	0.440	2.001	22.78
	3A	30.029	29.312	33.130	1.529	0.088	1.608	23.00
	3B	30.092	28.968	32.788	1.592	0.432	1.950	23.01
	4A	30.209	29.070	32.929	1.709	0.330	1.809	23.22
	4B	30.148	28.803	32.715	1.648	0.597	2.023	23.50
D102	1A	30.273	29.032	32.798	1.773	0.368	1.940	22.72
	1B	30.781	29.001	32.407	2.281	0.399	2.331	20.74
	2A	30.721	29.285	33.295	2.221	0.115	1.443	24.03
	2B	30.649	29.114	32.725	2.149	0.286	2.013	21.87
	3A	30.271	29.161	33.048	1.771	0.239	1.690	23.37
	3B	30.502	29.085	32.685	2.002	0.315	2.053	21.81
	4A	30.393	29.212	33.102	1.893	0.188	1.636	23.39
	4B	30.591	28.752	32.488	2.091	0.648	2.250	22.56
				Maximum wear	2.382	0.717	2.399	
				Average Wear	1.686	0.357	1.821	

차이를 보이며, 이 제동방식의 차이로 차륜 답면 부위의 마모량 차이는 평균적으로 50%정도까지 나타난다. 이 현상은 차륜 삭정 주기 및 차륜 수명에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

#### 2) 비대칭 복선 선로에 따른 영향

복선 선로를 동일한 진행방향으로 사용하는 본 전동차는 곡선 주행에서 캔트 부족량에 의해 일정 차륜의 플랜지가 지속적으로 힘을 받도록 되어있다. 따라서, 좌우 차륜은 선로의 비대칭성의 정도 및 현가장치의 특성에 따라 그 플랜지 마모량의 차이를 보이며, 그 차이는 대략 17% 정도에 이른다. 이러한 경우 좌우 답면 마모에 비대칭을 줄이기 위해 20만km 주행 후 차량 방향을 돌리는 방안으로 차량의 수명을 늘일 수 있으리라 판단된다.

#### 3) 전/후위 축의 위치에 따른 영향

곡선 주행시 완화곡선에서 대차의 전위축이 후위축에 비해 플랜지 횡방향 반력이 크며, 이로 인한 차륜 플랜지 마모량 차이를 검토하였다. 차량의 주행이 양방향으로 이루어짐으로 차량당 1,4축을 전위축으로, 2,3번 축을 후위축으로 전체 평균처리를 하였다. 그 결과 전위축과 후위축 간 15%의 차이를 보였다.

위 세가지 차륜마모의 영향에 대해 수치화한 표 4와 같다.

표 4 차륜의 조건에 따른 마모율 비교표

	차륜마모량/10만km	마모 비율	비 고
M-car	1.11 mm	76 %	비교부위: Sh at 63.5mm 전체 평균 : 1.46 mm
DT-car	1.81 mm	124 %	
A-side wheel	1.711 mm	108.6 %	비교부위: SDT at 22mm 전체 평균 : 1.576 mm
B-side wheel	1.441 mm	91.4 %	
전위축 (1,4 축)	1.698 mm	107.7%	비교부위: SDT at 22mm 전체 평균 : 1.576 mm
후위축 (2,3 축)	1.455 mm	92.3 %	

## 4 차륜 결함에 대한 조사

### 4.1 답면 끝단부의 광택면 (Polishing)

레진슈를 사용하는 답면 제동장치를 장착한 대차에서 차륜 답면 끝단부의 광택면은 일반적으로 나타나는 현상으로 판단된다. 이러한 이유는 주행시 레일과 거의 접촉하지 않는 부위가 지속적으로 레진슈와의 마찰로 인해 금속성 광택을 띠게 되는 것으로, 이와 관련하여 ERRI B64, RP1에서 확인 할 수 있다.

### 4.2 조각 박리 (Spalling/pitting)

조각박리(Spalling) 현상은 차륜 답면에 과도한 외력이 작용하여 국부적으로 파손이 발생한 것이다. 이것은 신선로에서 주로 발생되며, 선로가 일정 기간동안 사용된 이후에는, 이러한 답면 결함은 사라지는 것으로 조사된다.

Pitting은 모래나 부서진 금속 조각 등의 이물질들로 인해 발생하게 되는데, 이물질들이 차륜과 레일 접촉면 사이에 끼일 때 표면에 집중응력으로 발생하고, 이로 인해 차륜 표면의 부분 파손 되는 것이다. 그 외 Pitting 생성의 원인으로 차륜 답면의 경도와 선로 주변의 오염 정도, 그리고

일반적인 전동차 차륜 재질 UIC R8(탄소함유량: 0.56%, 270BH)보다 높은 탄소량과 표면경도를 적용하는 관찰 차량의 차륜 재질, IRS-R-19/93, Part4(탄소함유량: 0.63%, 310HB)에 대한 연관성에 대해 검토 중이다.



그림 7 답면제동적용 차륜의 끝단부 광택면



그림 8 Pitting



그림 9 Spalling



그림 10. Step wear

#### 4.3 답면 끝단부의 step wear

그림 10에서 보는 바와 같이 step wear 현상이 빈번하게 발생하여, 차륜업체와 차량 업체, 그리고 제동업체간 공동조사를 실시하였으나, 실제 차륜을 비디오카메라로 차륜의 거동을 살핀 결과, step wear가 발생한 영역은 레일과 거의 닿지 않는 영역임을 확인 할 수 있었다. 그리고, 해당 마모위치는 타부위와 신조 차륜에 비해 표면경도가 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 근거로 step wear 현상의 원인을 아래와 같이 분석된다.

##### 1) 롤링 효과 (Rolling effect)

그림 10에서 차륜과 레일이 접촉하는 B~D영역은 롤링 효과에 의해 접촉이 없는 A~B영역에 비해 높은 경도를 가지는 것으로 판단된다. 이와 같은 경도의 차이는 동일 위치에 답면제동이 일정기간 적용되었을 때 마모량의 차이를 가져오고, 이로 인해 끝단부의 step wear 현상이 발생한 것으로 설명된다.

##### 2) 제륜자와 차륜 사이 이물질 삽입

110,000km 정도의 주행거리를 갖는 DT107-2A, #4차량의 경우 일부 차륜에서 과도한 마모 현상을 보였는데, DT107-2A의 차륜의 경도를 측정된 결과, 답면 경도와 마모량의 상관 관

계를 확인 할 수 있었다.

표 5. 답면 경도 대조표

	Position D	Position C	Position B	Position D	Position C	Position B
value1	362.0	349.0	299.0	354.0	357.0	322.0
value2	359.0	354.0	293.0	339.0	356.0	327.0
value3	355.0	351.0	291.0	346.0	354.0	329.0
Aver	358.7	351.3	294.3	346.3	355.7	326.0
Location	DT107-2A		excessive wear	DT107-2B		normal wear

이러한 국소 부위 마모는 제륜자와 차륜 사이 이물질 삽입으로 해석이 가능하며, 이와 관련한 ERRI B64, RP6에서 유사 현상을 확인 할 수 있었다.

## 5 차륜 수명에 대한 검토

차륜 수명에 대한 검토에서 대상이 되는 전동차가 신선로에 운행을 시작하는 차량임과 주행거리가 13만km에 미치지 못한 점을 감안할 때 차륜 수명을 예측하고, 객관성을 확보하기에 부족한 부분은 있으나, 그 구체적 수치보다 방법적 접근방법에 무게를 두어 서술하고자 한다.

### 5.1 차륜 삭정 기준

선로와 차륜 형상의 접촉면 상호작용은 차륜과 선로의 답면 마모의 진행에 따라 필연적으로 변화되며, 그 변화의 폭이 허용치 이상으로 진행되어 차량의 안전성과 승차감에 영향을 미치게 될 때, 차륜을 삭정 보정하게 된다. 이때 삭정 기준은 차륜 및 차량을 관리해온 경험에 상당 부분 의존하고 있으며, 본 차량의 주요 삭정 기준은 아래 5표와 같다.

표 6. 차륜 삭정 기준

No.	마모 기준 답면 위치	기준 치수	허용치수	최대 마모량
1	Sh at 63.5mm, 답면 마모	28.5 mm	<= 33.5 mm	5.0 mm
2	Sd at 22 mm, 플랜지 두께	34.7 mm	>= 28.7 mm	6.0 mm
3	Sd at 13 mm, 플랜지 두께	29.4 mm	>= 26.4	3.0 mm
4.	플랜지 각도	30.5 °	17 °	

No.1은 답면 마모, No.2,3은 플랜지 두께에 대한 관리기준이며, 이외에 답면의 찰상, step wear의 깊이등 비정상적 마모에 대한 삭정 기준도 있으나, 본 수명검토에서는 위 기준에 국한하여, 일반적인 차륜의 수명을 예측한다. 그리고, 차륜 수명과 밀접한 관계가 있는 플랜지 각도를 다른 기준과 비교하기 위해 별도의 항목으로 비교하고자 한다.

### 5.2 차륜 수명 예상

차륜의 삭정한계 측정 부위별로 주행거리당 마모량을 조사하고, 이를 바탕으로 삭정 한계를 초과하였을 때 차륜 삭정 작업을 수행하는 것으로 가정한다. 10만km 주행거리당 마모량은 1편성 전체 평균값과 차축위치, 좌우, 차량의 종류에 따라 각각 별도로 관리하여, 보다 정확한 예측을 할 수 있도록 하였다. 그리고, 초기 신선로에서 차륜답면 안정화 단계까지 주행부분에 대한

영향도 배제하였다. 그 결과는 표 7 같다.

표 7 차륜조건별 주행거리당 마모율

	Tread Wear at Sh 63.5		Flange Wear at Sd 13		Flange Wear at Sd 22		Flange angle (deficiency)	
	Value	%	Value	%	Value	%	Value	%
편성 평균	1.09		0.29		1.03		0.73	
Dt-car	1.50	37.1%	0.21	-29.3%	1.17	13.8%	0.96	30.9%
M-car	0.69	-37.1%	0.38	29.3%	0.88	-13.8%	0.51	-30.9%
A side	1.08	-1.2%	0.24	-18.8%	0.91	-10.8%	0.68	-7.6%
B side	1.11	1.2%	0.35	18.8%	1.14	10.8%	0.79	7.6%
1,4 axle	1.05	-4.1%	0.43	47.7%	1.14	11.4%	0.71	-3.0%
2,3 axle	1.14	4.1%	0.15	-47.7%	0.91	-11.4%	0.76	3.0%

(단위 : mm/주행거리 10만km)

차륜조건별 주행거리당 마모율표는 주행거리당 편성평균 마모량과 조건별 마모량의 편차를 이용하여 세부 특정 위치의 마모 추정치를 예측할 수 있도록 작성하였으며, 최악조건인 위치의 마모율은 아래의 수식으로 추정 가능하다.

**Flange Wear at Sd 22** [worst case : Dt-car(13.8%), B side(10.8%) , 1,4axle(11.4%)]

$$= 1.03 \times 1.138 \times 1.108 \times 1.114$$

$$= 1.45 \text{ [mm/10만km]}$$

**Flange Wear at Sd 13** [worst case : M-car(29.3%), B side(18.8%), 1,4axle(47.7%)]

$$= 0.66 \text{ [mm/10만km]}$$

마모율을 바탕으로 삭정한계까지 도달하는 주행수명은 표8과 같다.

표 8 조건별 삭정한계 주행수명

	Tread Wear at Sh 63.5	Flange Wear at Sd 13	Flange Wear at Sd 22	Flange angle (deficiency)
삭정기준	5.0 mm	3.0 mm	6.0 mm	2.6 mm
삭정량	6 ~10 mm	6 ~10 mm	12 mm	-
편성 평균	45.7	103.1	58.5	34.7
Dt-car	33.3	145.8	51.4	26.5
M-car	72.7	79.8	67.9	50.2
A side	46.3	127.0	65.6	37.6
B side	45.2	86.8	52.8	32.3
1,4 axle	47.7	69.8	52.5	35.8
2,3 axle	43.9	197.2	66.1	33.7
Worst case	N/A	45.5 (M car)	41.4 (Dt car)	N/A

(단위 : mm/10만km)



한 대차의 4개의 차륜 삭정은 동시에 이루어 지는 것을 고려하여, 표8을 기준으로 차륜 조건별 삭정주기가 가장 짧은 차륜을 검토하였다. Dt-car의 경우 플랜지 답면 마모에 의해 전체의 삭정주기가 결정되고, M-car의 경우 플랜지 상부 두께 마모 부위에 의해 삭정됨을 알 수 있다.

그리고 차륜 삭정량은 삭정한계 도달부위 이외에 타 부위의 마모를 모두 보상할 수 있는 량으로 결정되어야 함으로 최대 마모부위 이외 부분의 마모량을 주행거리별로 연산을 하여 기하학적 반복수행을 통해 추정하였다. 이것으로 예상한 차륜의 수명은 다음과 같다.

	삭정 검출 및 삭정 주기	삭정량	삭정가능회수	차륜 수명
Dt-car	플랜지 답면 : 33.3 만km	9.5 mm	3 회	133 만km
M-car	플랜지 상부 두께 : 45.5 만km	10 mm	3 회	182 만km

## 6 결론

본 연구는 전동차의 납품후 차량 시험 운행에서부터 상업운행에 이르기까지 차륜에 대한 자료를 수집, 정리하여 설계와 차량관리의 자료로 활용하기 위한 목적으로 수행하였으며, 그 결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- ▶ 신선로에서 차륜 마모는 4만km 주행 이후 안정화됨.
- ▶ 차륜 마모는 제동장치의 종류, 선로의 비대칭성, 차륜의 위치 등의 영향을 받으며, 각각 50%, 17%, 15%정도 마모량 차이가 관찰됨.
- ▶ 차륜에 나타난 결함으로는 Polishing, pitting, step wear등이 발생하였으며, 이러한 결함은 신선로 사용 초기단계에서만 나타나는 현상으로, 차량 주행 성능에는 큰 영향을 없는 현상으로 판단됨.
- ▶ 차륜의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 부위는 Dt-car의 경우 플랜지 답면 마모이며, M-car의 경우 플랜지 상부 두께 마모이다. 두 경우의 차륜 삭정 주기는 각각 33.3만 km, 45.5만km으로, 최소 허용 차륜 직경까지 3회의 삭정을 통해 각각 133만km와 162만km의 차륜 주행수명이 예상됨.

## 참고문헌

- [1] ERRI Committee B64(1965), Comparative Tests On The Testing Plant, ERRI B64 reports No.1
- [2] ERRI Committee B64(1969), Metallic inclusion in the composition brake blocks, ERRI B64 reports No.6
- [3] UIC standard, 60kg/m Rail profile, UIC standard 861-3
- [4] DMRC, "RS1 Employer's Requirements : Technical specification", 1999