

# 도시철도 차량 차륜 플랜지의 마모패턴에 관한 연구

## A Study On Wear Pattern of Wheel Flange for Urban Railway Vehicle

노학락 \*

맹희영 \*\*

권석진 \*\*\*

Noh, Hang Nak

Maeng, Hee Young

Kwon, Seok Jin

### ABSTRACT

The surface of railway wheel tread in wheel-rail system can not be free from wear because of various circumstance such as railway condition, maintenance condition, weather condition, characteristics of wheel surface's geometrical shape, and vehicle suspension's structural characteristics etc. Therefore, the research on wear reduction and maintenance method are very important to ensure the safety of railway vehicle, to improve car comfort and to decrease maintenance cost. In this study, the wear rates of railway wheel have been periodically measured in terms of the running distance of Electrical Multiple Unit which have been currently operated and the microstructure transformation of wheel tread using replication method have been performed. The results show that the relations between the flange wear and tread microstructure are depended on running distance and it will supply basic data on wheel maintenance.

### 1. 서론

철도차량의 속도나 승차감 등의 성능에 영향 미치는 요인들 중에서 차륜과 선로의 접촉상태는 가장 큰 요인이라 할 수 있다. 도시철도 차량의 경우 대부분이 지하구간으로 정차역간 거리가 1~2km 이내의 단거리로 최고속도가 100km/h정도의 비교적 저속으로 가속과 정차를 반복하여 운행하게 되며, 신규노선의 경우 기존의 도심을 통과함에 따라 많은 곡선구간을 거치게 되어, 승차감 향상이나 비용절감을 위하여 차륜과 선로간의 유지보수는 중요한 요인이 되고 있다. 도시철도 차량은 일반철도와 달리 많은 승객을 단시간에 단거리 수송을 목적으로 하므로 량당 수송인원이 많고 좌석승객 뿐만 아니라 입석승객이 많아 객실 내에서의 승객 유동 및 승하차에 따른 차체 진동 등도 차륜 및 선로에 영향을 주는 요인 될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 도시철도 차량의 차륜 플랜지의 마모에 대한 일반적인 패턴을 분석하기 위하여 표면복제법(Replica법)을 사용하여 주행거리에 따른 차륜 표면 조직특성 변화를 확인하였고, 상업운행중인 도시철도 차량의 차륜 담면을 주기적으로 측정한 자료를 바탕으로 운행기간, 차륜 직경크기에 따른 차륜 플랜지의 마모량을 분석하였다.

\* 서울산업대학교 철도전문대학원, 서울도시철도공사, 정희원

E-mail : noh6758@hanmail.net

TEL : (02)6311-3547 FAX : (02)6311-4317

\*\* 서울산업대학교 교수

\*\*\* 철도기술연구원, 선임연구원, 정희원

## 2. 표면복제법에 의한 차륜답면 조직특성 변화

### 2.1 시험방법

차륜답면의 조직특성을 분석하기 위해 상업 운행중인 도시철도 차량의 차륜에서 시료를 과괴적으로 채취하는 것은 현실적으로 어려우므로 표면 금속조직을 다른 물질에 복제시켜 그 물질을 실험실에서 간접적으로 관찰 분석할 수 있는 표면복제법(Replication)을 사용하였다. 표면복제법(Replication)의 방법은 ASTM E1351에 규격화되어 있다.

Replica 채취시 일반적으로 외부적인 영향(산화 스케일, 오염, 응력 등에 의한 표면만의 국부적인 변화 등)을 제거하기 위해 0.3~2.0mm까지 연마를 하는 것이 좋으나 상업운행중인 전동차의 차륜의 여건상 0.1~0.3mm정도의 연마만을 시행하였다. 연마의 초기엔 산화피막을 연삭한 후 점차 미세한 연마지를 사용하여 연마하였으며, 최종 연마시에는 6μm와 1μm의 다이아몬드 연마제를 사용하였다. 부식액으로는 2% Nital용액을 이용하여 부식시킨 후 0.035mm 두께의 셀룰로우즈 아세테이트 필름을 사용하여 미세조직을 복제하였다. Replica는 대비를 좋게 하기 위하여 금으로 진공 스퍼터 코팅한 후, 실험실에서 광학현미경으로 X100 ~ X400배의 배율로 관찰하였다. Replica Film 분석용 광학현미경은 올림페스 CCD ProgRes C10을 사용하였고 이미지 분석 Program은 iSolution을 사용하였다.

시험 대상은 도표 1과 같이 상업운행중인 서울도시철도 7호선 전동차중 차륜삭제 후 주행거리가 서로 다른 3개편성을 대상으로 하였고, 각 차량에 답면제동방식(M-car)과 디스크 제동방식(T-car)의 차륜 각 1개씩을 선정하여 검사를 시행하였다. 제동방식별 차륜의 표면에 작용하는 하중의 형태가 다르므로 답면 제동과 디스크 제동의 방식에 따라 각각 그림 1과 같은 위치에 대하여 측정하였다.

도표 1. 시험대상 차륜

대상차량	차종	Material	주행거리(Km)	비고
A	T-car	SSW2	0	
	M-car			
B	T-car	SSW2	47,000	
	M-car			
C	T-car	SSW2	226,000	
	M-car			

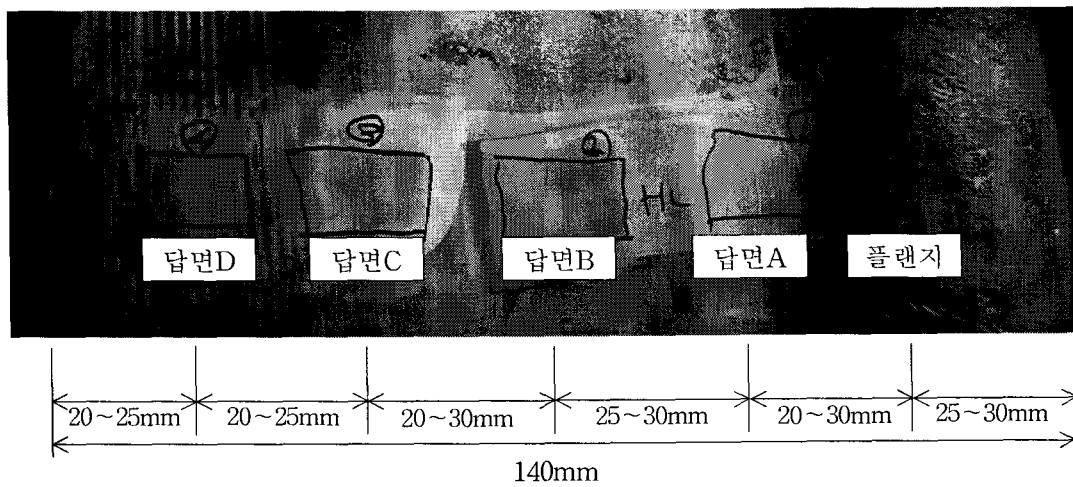


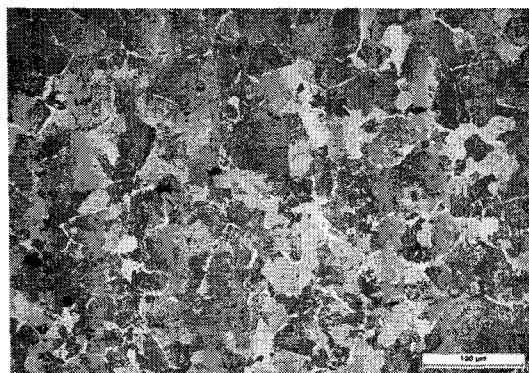
그림 1. Replica 채취 부위

## 2.2 시험 결과

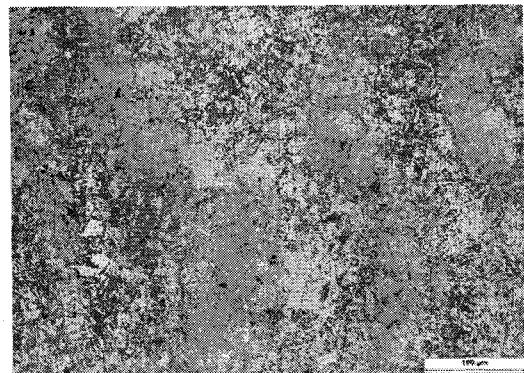
차륜의 표면 Replica 검사 결과 다음과 같이 주행거리, 제동방식(M-car : 답면제동, T-car : 디스크제동) 및 차륜 각 부위별로 조직변화의 특성이 차이를 보이는 것으로 나타났다.

신차륜의 경우 그림 2(a)와 같이 부위에 관계없이 망상의 페라이트(ferrite, 흰색)와 퍼얼라이트(pearlite, 검은색) 조직을 보이는 일반적인 탄소강의 형상을 나타내고 있다. 플랜지 부분의 경우 차량의 주행 중 횡방향의 하중을 주로 받는 부위로 레일과의 접촉으로 인해 마모와 변형이 동시에 일어난다. 그림 3과 같이 M-car와 T-car에서 모두 조직의 변형이 나타나며 균열은 보이지 않는다. 또한 주행거리에 따른 차이는 크지 않으나, T-car에 비하여 M-car의 변형이 더 심하다. 답면A는 플랜지와 답면의 경계부분으로 횡압과 수직하중의 영향으로 M-car의 경우 표면에 미세한 균열이 발생하고 있으며, 주행거리가 늘어남에 따라 균열의 정도도 커진다. 이는 제륜자의 접촉면과 비접촉면의 경계부분에서 발생되는 응력 차이로 인해 균열이 발생되는 것으로 보이며, 이 부분에서 그루빙 마모와 손상이 진행됨을 나타낸다. T-car의 경우 균열이 거의 보이지 않으며 주행거리에 따른 뚜렷한 변화도 보이지 않는다.

답면C의 경우 그림 4와 같이 주행거리에 따른 균열의 발생이 뚜렷이 보이며, M-car의 균열이 더 심하다. 이 부분은 차륜과 레일이 주로 접촉되는 면과 접촉이 되지 않는 면의 경계부분으로 응력발생의 차이와 답면제동 방식의 차륜의 경우 제륜자와의 접촉에 의한 하중과 제동마찰열에 의한 열응력에 의해 균열의 발생이 더 심하게 나타나고 있다.

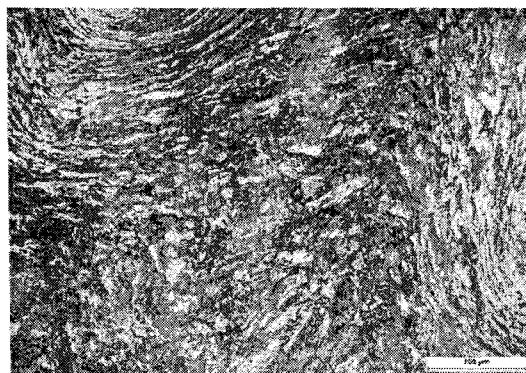


(a) 신차륜



(b) 226km 주행차륜(M-car)

그림 2. 주행거리에 따른 시험 차륜 표면 조직

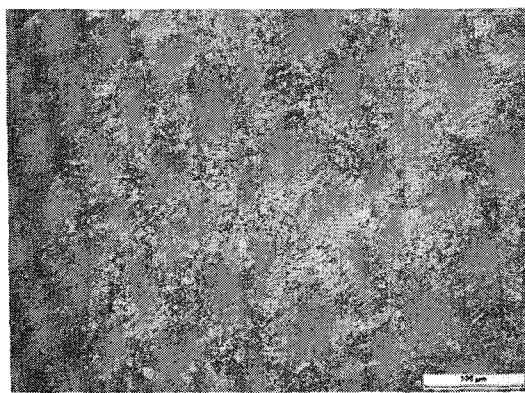


(a) 47,000km 주행차륜(M-car)

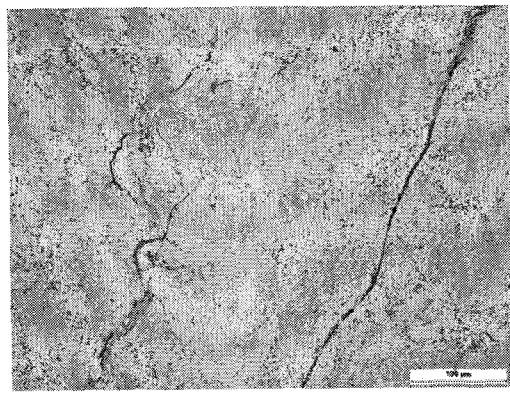


(b) 47,000km 주행차륜(T-car)

그림 3. 플랜지 표면 조직



(c) 47,000km 주행차륜(T-car)



(d) 226,000km 주행차륜(T-car)

그림 4. 담면 C 표면 조직

### 3. 차륜 플랜지 마모분석

#### 3.1 분석 방법

도시철도 차량의 차륜은 찰상이나 기타 조건에 의한 손상의 경우를 제외한다면 일반적으로 담면의 실제 마모는 미미하며 플랜지의 마모로 인한 담면삭정으로 차륜의 직경감소에 의해 사용수명이 결정된다. 본 연구에서는 플랜지 마모에 대한 일반적인 패턴을 파악하기 위해 상업운행중인 도시철도차량의 차륜 담면을 주기적으로 측정한 자료를 바탕으로 운행기간, 차륜 직경크기별 마모량을 분석하였다.

분석대상 차량은 서울도시철도 5~8호선 전동차 200개 편성에 대하여 시행하였으며 차륜의 데이터는 각 호선별로 최근 신차륜(직경 860mm)에서 사용한도(직경 780mm)까지 사용한 차륜의 측정 데이터만을 대상으로 하였다.

차륜의 삭정은 최초 신차륜의 경우 직경 860mm에서 780mm까지 삭정을 할 수 있도록 규정하고 있으며 플랜지 두께는 최대 34mm에서 최소 23mm까지를 사용한도로 하고 있다. 본 연구에서는 차륜의 직경이 삭정에 의해서만 줄어들고 차량의 주행중 플랜지가 지속적으로 마모되는 것으로 가정하여 직경의 크기에 따른 마모율의 변화를 분석하였다. 차륜의 직경은 860~780mm까지 각 5mm 단위로 주행거리 1만km당의 마모량을 산출하였으며 비정상적인 과대, 과소 마모의 영향을 배제하기 위하여 마모율이 1만km당 1mm이상의 경우 및 0인 데이터는 제외하였다.

도표 2. 분석대상 전동차 현황

호선	량/편성	차량종 량(ton)		차륜 담면 Profile	차량조성	제동방식	비고
계	1,558/200	공차	만차				
5호선	608/76	TC : 33	TC : 53	1/20경사	4M 4T	회생제동 및 공기제동 혼합	
6호선	328/41	M1 : 36	M1 : 56	원호담면	"	"	
7호선	496/62	M2 : 36	M2 : 56		"	"	
8호선	126/21	T : 29	T : 49	1/20경사	"	"	
		(about)	(about)	"	3M 3T	"	

#### 3.2 분석결과

각 노선별로 M-car(담면제동) 및 T-car(디스크제동)의 차륜을 구분하여 차륜 직경별로 평균 마모량을 산출한 결과는 도표3~6과 같다.

차륜 플랜지 두께의 마모량 분석결과 각 호선별, 차륜의 직경별로 마모량의 차이를 보인다. 호선별의 차이는 각 노선의 운행조건에 따른 차이이므로 본 연구에서는 언급하지 않겠다.

차륜 직경별 마모량의 차이는 전호선에 공통적으로 직경이 원형(860mm)일 때 마모율이 낮은 것으로 나타난다. 5호선은 855~820mm 구간에서 마모율이 높고 810mm 이하에서는 일정한 마모율을 보이며, 6호선과 8호선은 직경이 작아질수록 마모율이 점진적으로 증가한다. 7호선은 직경이 850~840mm 구간과 810mm 이하의 구간에서 마모율이 높게 나타난다. M-car와 T-car의 마모율 차이는 크게 나지 않는다.

도표 3. 5호선 전동차의 차륜 플랜지두께 1만km당 평균 마모율

구분	~ 860mm	859mm ~ 855mm	854mm ~ 850mm	849mm ~ 845mm	844mm ~ 840mm	839mm ~ 835mm	834mm ~ 830mm	829mm ~ 825mm	824mm ~ 820mm
M-car	0.26	0.40	0.44	0.42	0.47	0.41	0.52	0.43	0.44
T-car	0.24	0.41	0.44	0.43	0.44	0.38	0.47	0.42	0.42
전체	0.25	0.40	0.44	0.42	0.46	0.40	0.49	0.43	0.43

구분	819mm ~ 815mm	814mm ~ 810mm	809mm ~ 805mm	804mm ~ 800mm	799mm ~ 795mm	794mm ~ 790mm	789mm ~ 785mm	784mm ~ 780mm	비고
M-car	0.35	0.34	0.36	0.36	0.33	0.27	0.29	0.34	
T-car	0.39	0.29	0.33	0.32	0.29	0.33	0.34	0.34	
전체	0.37	0.32	0.34	0.34	0.31	0.29	0.31	0.34	

도표 4. 6호선 전동차의 차륜 플랜지두께 1만km당 평균 마모율

구분	~ 860mm	859mm ~ 855mm	854mm ~ 850mm	849mm ~ 845mm	844mm ~ 840mm	839mm ~ 835mm	834mm ~ 830mm	829mm ~ 825mm	824mm ~ 820mm
M-car	0.10	0.14	0.15	0.12	0.12	0.13	0.11	0.15	0.16
T-car	0.10	0.17	0.14	0.12	0.12	0.13	0.13	0.17	0.20
전체	0.10	0.14	0.14	0.12	0.12	0.13	0.12	0.16	0.17

구분	819mm ~ 815mm	814mm ~ 810mm	809mm ~ 805mm	804mm ~ 800mm	799mm ~ 795mm	794mm ~ 790mm	789mm ~ 785mm	784mm ~ 780mm	비고
M-car	0.22	0.20	0.17	0.23	0.17	0.12	0.18	0.28	
T-car	0.24	0.19	0.21	0.24	0.31	0.16	0.07	-	
전체	0.22	0.20	0.19	0.23	0.23	0.15	0.17	0.28	

도표 5. 7호선 전동차의 차륜 플랜지두께 1만km당 평균 마모율

구분	~ 860mm	859mm ~ 855mm	854mm ~ 850mm	849mm ~ 845mm	844mm ~ 840mm	839mm ~ 835mm	834mm ~ 830mm	829mm ~ 825mm	824mm ~ 820mm
M-car	0.14	0.20	0.48	0.49	0.47	0.39	0.39	0.29	0.38
T-car	0.14	0.16	0.48	0.48	0.44	0.36	0.36	0.31	0.38
전체	0.14	0.18	0.48	0.48	0.46	0.38	0.37	0.30	0.38

구분	819mm ~ 815mm	814mm ~ 810mm	809mm ~ 805mm	804mm ~ 800mm	799mm ~ 795mm	794mm ~ 790mm	789mm ~ 785mm	784mm ~ 780mm	비고
M-car	0.45	0.53	0.51	0.59	0.56	0.56	0.55	0.57	
T-car	0.44	0.51	0.52	0.56	0.53	0.55	0.48	0.57	
전체	0.45	0.52	0.51	0.58	0.55	0.56	0.52	0.57	

도표 6. 8호선 전동차의 차륜 플랜지두께 1만km당 평균 마모율

구분	~ 860mm	859mm ~ 855mm	854mm ~ 850mm	849mm ~ 845mm	844mm ~ 840mm	839mm ~ 835mm	834mm ~ 830mm	829mm ~ 825mm	824mm ~ 820mm
M-car	0.20	0.13	0.20	0.19	0.16	0.15	0.23	0.26	0.30
T-car	0.14	0.15	0.17	0.17	0.21	0.20	0.25	0.29	0.27
전체	0.17	0.15	0.19	0.18	0.19	0.17	0.24	0.27	0.28

구분	819mm ~ 815mm	814mm ~ 810mm	809mm ~ 805mm	804mm ~ 800mm	799mm ~ 795mm	794mm ~ 790mm	789mm ~ 785mm	784mm ~ 780mm	비고
M-car	0.19	0.25	0.32	0.30	0.25	0.29	0.37	0.43	
T-car	0.31	0.30	0.28	0.30	0.31	0.34	0.30	0.33	
전체	0.25	0.27	0.30	0.30	0.28	0.31	0.33	0.37	

### 3.3 도시철도 차량 차륜 플랜지 마모 경향

위의 분석결과에서는 그림 5와 같이 차륜의 직경이 클수록(원형에 가까울수록) 플랜지의 마모율이 낮고 삭정에 따른 직경의 감소에 따라 마모율이 증가함을 보이고 있다. 각 호선별 플랜지 마모율의 평균 값을 차륜이 원형(860mm)일 때의 마모율을 기준으로 비율로 나타내면 직경이 감소함에 따라 마모율은 호선별 차이가 있으나 평균적으로 최고 2.73배까지 증가한다.

차륜의 직경 감소는 원주길이 감소로 차륜답면의 특정점이 선로와 접촉하는 회수가 증가함을 의미하며 사행동 주기가 단축된다. 결과적으로 답면의 구름운동에 따른 온도상승과 제동 마찰열의 상승(M-car), 차체의 Yawing, 플랜지 공격각 증대로 인한 마모율 증가의 메카니즘으로 진행됨을 추정할 수 있다.

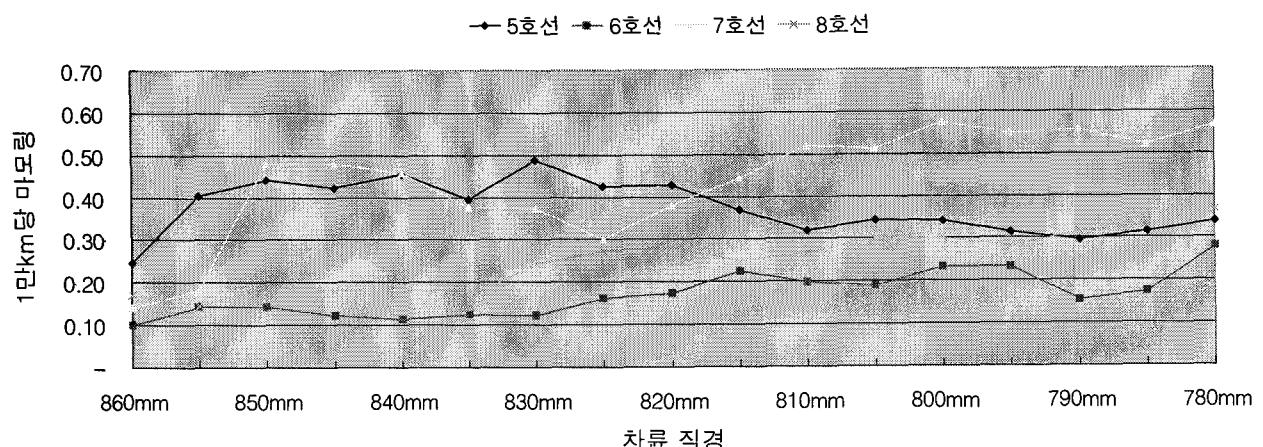


그림 5. 호선별 마모율

#### 4. 결론

도시철도 차륜의 마모 특성을 분석하기 위하여 표면복제법을 이용한 차륜플랜지와 차륜답면 조직변화 및 마모율 분석 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 차륜 플랜지부의 조직시험 결과에서 레일파의 반복접촉으로 인하여 주행거리에 따라 차륜플랜지부의 조직이 변형되고 있어 마모에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 플랜지의 마모는 균열에 의한 것이 아니라 횡압에 의한 레일파의 압착과 마찰로 인한 표면조직 탈락이 주원인임을 알 수 있다..
- 2) 차륜플랜지부와 인접한 차륜 답면부에서는 레일파의 횡압에 의하여 미세한 균열이 진행되고 있으며, 이 부분에서 그루빙 마모(grooving wear) 및 손상이 진행되고 있다.
- 3) M-car(구동차)의 차륜표면이 T-car(부수차)의 차륜표면에 비하여 손상정도가 크게 나타나고 있으며, 이것은 제륜자와 차륜파의 제동시 마찰열을 효과적으로 발산하지 못하고 있음을 의미한다. 그러나 플랜지 마모량의 차이는 크지 않다.
- 4) 주행거리에 따른 차륜답면 조직의 현저한 차이는 발생하지 않았으나, 차륜 플랜지부와 차륜 답면부의 위치에 따라 손상이 발생하고 있다.
- 5) 플랜지의 마모량은 차륜 직경 크기에 따라 마모율에 현저한 차이가 있으며, 직경의 크기가 원형 (860mm)에 가까울수록 마모율이 적고, 삭정에 따라 직경이 감소함에 따라서 플랜지의 마모량도 증가함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 김태호, 임원식 (2005년), “도시철도차량의 횡방향 운동 특성에 대한 실험적 연구”, 한국철도학회 2005춘계학술대회 논문집
2. 권석진, 이동형 (2007년), 집중유도 교류 전위차법을 이용한 철도차량 차륜의 표면과 내부 결함 평가 “.한국철도학회 논문집 제10권 제1호.
3. 서울도시철도공사 (2000년), 7호선 전동차 정비지침서, 1권,
4. 서울도시철도공사, 전동차정보시스템(1998~2007) 차륜측정데이터
5. S.J.Kwon, D.H.Lee, J.W.Seo and H.J.Kim, Damage Analysis and Reprofiling for Railway wheel tread using Replica and Fracture Mechanics, International conference on ATEM, 2007