

차륜 답면과 레일의 경계영역에서의 마모 특성

Wear characteristics depended on Wear Index in Wheel-Rail Interface

안중곤† 권석진* 손영진** 김호경**
Jong-Gon Ahn, Seok-Jin Kwon, Young-Jin Son. Ho-Kyung Kim

ABSTRACT

Wheel and rail wear is a fundamental and complicate problem in railway field. The life of railway is usually limited by wear. The wheel surface is subjected to high normal and tangential contact stress. The removal of material from the surface by wear is function of the sliding and contact stress. In the present paper, the wear characteristic depended on slip rate, contact pressure and temperature are investigated and is used to twin disc tester. The result shows that the wear in wheel-rail interface is remarkably depended on slip rate and contact pressure.

1. 서 론

철도차량을 지지하고, 전동차가 레일을 따라 운행할 수 있도록 발생하는 모든 힘은 차륜과 레일의 경계영역에서의 접촉면(contact patch)에서 마모가 발생한다. 차륜과 레일의 경계영역에서의 마모현상은 철도시스템에서 기본적인면서 복잡한 문제이다. 차륜의 수명은 일반적으로 마모에 의하여 결정된다. 차륜 표면에서는 높은 수직하중과 전단하중이 작용하며 접촉력은 레일 선로, 국부적인 접촉압력에 의하여 변화한다. 이러한 접촉은 통상적으로 구름접촉이지만 경계영역에서 국부적으로 작은 미끄럼에 의하여 발생한다. 그 미끄럼의 크기는 접촉형상(contact patch geometry), 수직하중, 횡압과 마찰계수 슬립률에 따라 영향을 미친다.

마모 영향인자 해석은 차륜삭정에 따른 유지보수 계획을 효과적으로 결정하기 위하여 해석된 마모 영향 인자를 토대로 하여 마모시험 데이터를 이용하여 마모 예측모델을 정립한 다음 이를 소형시험기인 twin disc 형태의 시험기로 시뮬레이션 하는 연구로 진행되고 있다. 실물 시험기보다 실험적 변수를 비교적 제어할 수 있고 폭넓은 재료적 거동 시험을 할 수 있는 장점 때문에 이용된다. 차륜-레일의 경계영역에서 차륜-레일의 경계영역에서 마모 특성은 속도에 의존하는 것 보다는 슬립율과 접촉압력에 의하여 크게 좌우되고 되기 때문에 본 연구에서는 twin disc 형태의 시험기를 이용하여 마모 특성 시험을 실시하였으며 슬립율, 접촉압력, 접촉온도 등의 변화에 따른 마모 영향인자의 변화를 연구하였다. 또한, 고속도 영역에서의 마모율의 변화에 대해서도 검토하였다. 서울메트로에서 운용되고 있는 전동차의 각 노선 별로 전동차에 대한 차륜 교환에 대한 내용을 알아보았다. 2호선기지에 방향전환선인 델타선(delta track)과 3호선 차량기지의 전동차 방향전환선로(loop)가 신설되었다. 그 후의 방향전환선 사용을 전후로 하여 호선 별로 차륜교환량을 비교하여 분석하였으며, 또한 차륜의 재질로 인한 인장강도, 경도, 피로 및 비틀림 시험과 슬립 및 접촉압력과 접촉온도의 변화에 따른 마모량을 분석하였다. 철도차량의 동역학 개념철도차량의 운동은 6 방향 성분으로 주행 시 직선운동, 회전운동 등으로 분류하며, 차륜과 레일사이에서 발생하는 크립력(Creep Force)이 큰 영향을 미친다. 이 힘의 반력을 크리이프 힘(Creep Force)

† 교신저자, 서울메트로

E-mail : 332350@hanmail.net

* 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실

** 서울과학기술대학교 자동차공학과

이라 한다. 크리이프지(creepage)는 차륜과 레일의 강성이 강하여 접촉면에서 변형률의 차이가 없을 때의 속도를 순수 구름 운동이라 하며 크리이프가 발생하면, 차륜과 레일 사이의 속도 차이가 발생하고, 이 상대속도를 순수 구름 속도로 나누어 무차원화 한 값이다. 차륜이 횡방향(Lateral force) 으로 힘을 받아 그 후렌지 부분에서 레일과 접촉하여 타고 오르게 되는 상황을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

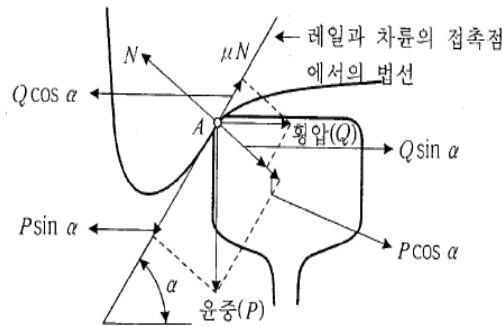


그림 1. 레일에 미치는 횡압

이 경우 A점에서 차륜은 횡압 Q와 윤중 P를 레일에 가하며, 이 힘의 비(比) Q/P가 얼마일 때의 값을 탈선의 Q/P 한계치가 된다. 곡선부에서는 주행을 원활하게 위해 차륜의 답면에는 1/40, 1/20 등 약간의 구배(Conicity)를 주고 있다. 이 때문에 직선 주행 시에 어떤 속도 이상이 되면 차륜이 좌우로 자려운동(自動運動)을 일으켜 소위 사행동(蛇行動, Hunting)이 생긴다. 어택각(attack angle)을 갖고 곡선을 통과하게 되면 레일과 후렌지(flange)가 접촉하여 횡압이 증가하여 차륜의 후렌지가 현저하게 수직마모(垂直磨耗, Vertical wear)되며. 이 때문에 급곡선에서 공격각으로 횡압도 높고. 또한 레일 코러게이션(Corrugation: 물결무늬)이나 빼걱거리는 소리의 원인이 되고 있다.

$$\bullet \quad 2\pi \frac{br}{\gamma}$$

S : 사행동 파장

b : 좌우 차륜이 레일과 접촉하는 점 사이의 직선거리의 1/2

r : 접촉점에서의 차륜의 반지름

γ : 접촉점에서의 차륜답면의 구배

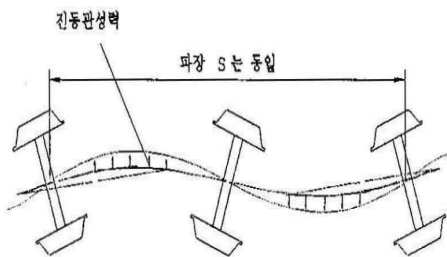


그림 2. 철도차량의 동력학도

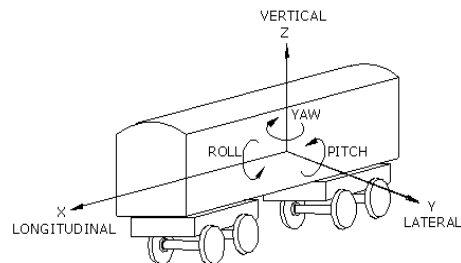


그림 3. 사행동에 대한 관성력의 영향

2 서울 메트로 노선구성

서울 메트로의 노선은 도심을 통과하게 되므로 도표 1과 같이 곡선의 반경이 적으므로 차륜과 레일에 걸리는 곡선 횡압(橫壓, Lateral force)은 커질 수밖에 없는 노선구조로 되어있다. 2호선은 2개의 주요 순환선으로 구성 되어 있으며 외선은 시계반대방향으로 주행하고 내선은 시계방향으로 주행한다. 3호선은 2호선 노선보다는 상대적으로 완만한 곡선이 많은 특징을 가지고 있다. 그림 4, 5와 같이 방향전환

선(loop)을 설치 2호선 델타(Δ , delta)선, 3호선은 루프(loop)선을 신설하여 주기적으로 방향전환을 시행하여 차륜의 한 쪽 방향만 마모되는 것을 방지하여 도표 1에서 차륜의 사용기간을 연장하였다.

도표 1. 호선별 최소 곡선반경^⑧

구분	1호선	2호선			3호선	4호선
		순환선	성수지선	신정지선		
최소반경	136m	200m	150m	246m	199m	180m



그림 4. 군자차량기지 델타선

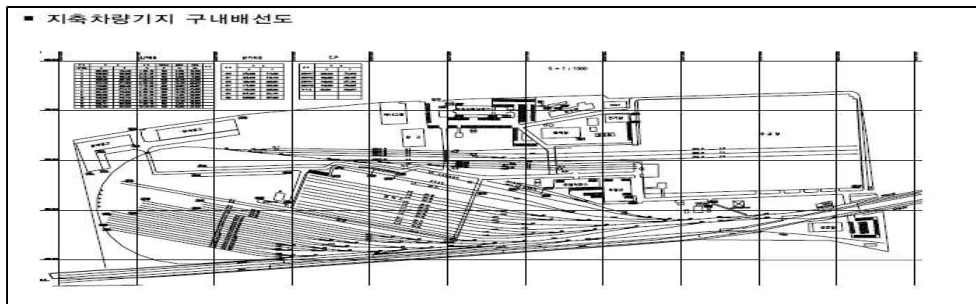


그림 5. 지축차량기지루프선

2.1 2호선의 루프선 사용 전후의 차륜 평균사용기간 비교

도표 2. 2호선 루프선 사용 전후의 차륜평균사용기간 비교(월)

편성	264	266	270	273	275	280	282	293	295	평균
사용전	43	32	54	26	47	56	56			45
사용 후	72	55	62	61	62	54	65	61	60	61

도표 3. 3호선의 루프선 사용 전후의 차륜평균사용기간 비교(월)

편성	301	302	305	310	315	320	330	335	345	평균
사용전	42	45	50	36	44	55	45		72	49
사용후	78	96	86	88	76	71	79	85	87	84

서울메트로 2호선 순환선에 운용중인 203편성의 2량을 차륜직경 및 후렌지 두께를 측정간결과 도표 4에서 1개월 사용후 감소가 되어야 하나 소량의 차륜에서 그림6과같이 미소하게 증가되는 현상을 발견하였다 측정결과 측정의 오차가 아니고 재질의 열처리 과정에서 무름현상 즉 경도의 차이에 의한 것으로 분석되었다 그림7에 경도를 측정한 결과 답변깊이에 따라 경도의변화가 불균일하게 발생하였다

도표 4. 월별 차륜직경 및 후렌지 측정Miniprof

차호	후렌지위수	(2010.12.5)	(2010.12.6)	2011.01.02)	(2011.02.11)	(2011.03.04)
2203	1	29.78	29.78	29.88	29.75	
	2	32.59	32.58	31.84	31.70	
	3	32.11	32.33	32.28	31.53	
	4	32.41	32.56	32.71	32.49	
	5	31.82	31.61	31.71	31.56	
	6	34.01	33.83	33.51	33.28	
	7	30.00	29.97	29.94	29.21	
	8	30.06	30.04	30.07	29.88	
2303	1	28.55	28.53	28.55	28.11	
	2	34.69	34.76	34.11	33.81	
	3	32.17	32.13	32.18	31.65	
	4	34.52	34.46	34.48	34.25	
	5	30.88	30.81	30.84	30.60	
	6	34.55	34.53	34.17	33.95	
	7	27.23	27.35	27.24	26.49	
	8	29.21	29.33	29.13	28.76	
2203	1	831.90	830.12	830.94	828.20	
	2	829.63	830.04	829.63	828.81	
	3	830.37	830.86	830.59	828.71	
	4	831.79	831.59	831.17	830.60	
	5	834.56	834.94	834.72	832.10	
	6	833.46	833.20	833.49	832.70	
	7	829.33	830.28	828.81	828.30	
	8	832.94	832.84	831.12	831.12	
2303	1	815.78	815.95	816.19	814.21	
	2	814.31	814.45	814.18	814.24	
	3	814.82	813.23	814.04	813.30	
	4	816.58	816.63	816.02	815.39	
	5	814.59	814.65	812.97	812.97	
	6	815.18	814.66	815.35	814.73	
	7	812.33	812.38	811.20	811.28	
	8	813.16	812.25	812.12	812.01	

서울메트로 2호선 순환선에 운용중인 203편성의 2량을 차륜직경 및 후렌지 두께를 측정한 결과 표4에서 1개월 사용 후 감소가 되어야 하나 소량의 차륜에서 그림 6과같이 미소하게 증가되는 현상을 발견하였다 측정결과 측정의 오차가 아니고 재질의 열처리 과정에서 무름현상, 즉 경도의 차이에 의한 것으로 분석되었다 그림7에 경도를 측정한 결과 답면 깊이에 따라 경도의변화가 불균일하게 발생하였다.



그림 6. 차륜 답면의 표면 밀림현상

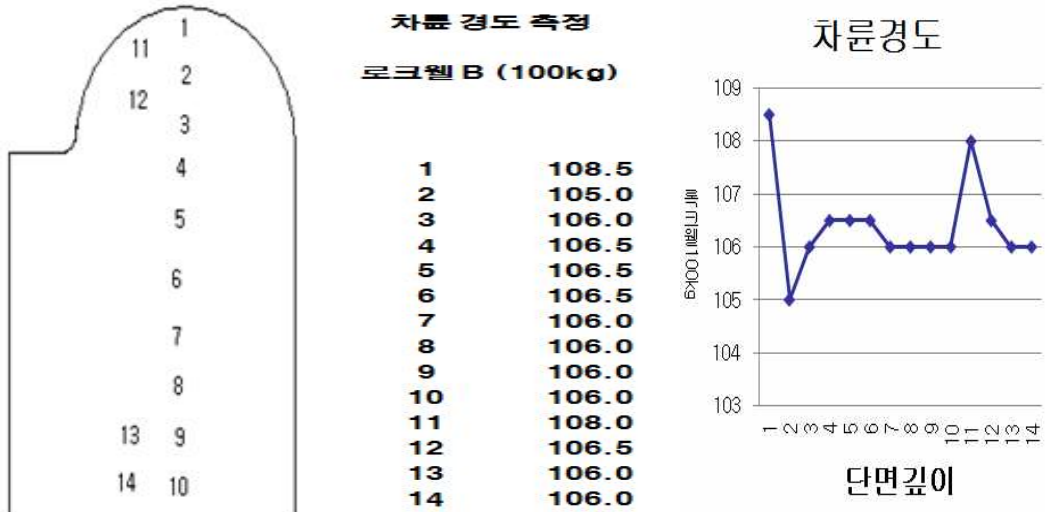


그림 7. 차륜의 답면깊이와 후렌지의 경도

3. 마모 인자 시험 및 절차

차륜의 답면과 레일의 경계영역의 접촉부에서 마모 인자 특성을 시험하기 위하여 그림 8과 같은 twin disc를 이용한 마모 시험을 실시하였으며. 시험기의 특성은 차륜과 레일의 회전속도에 따라 슬립율 제어를 용이하게 할 수 있으며. 시편부위에 환경 챔버가 있어 각종 운할조건의 시험이 가능하며 마모 영향인자 시험 시편은 국내에서 사용되고 있는 차륜과 레일 실물에서 시편을 채취하였으며 직경 50mm, 두께 10mm의 시편으로 가공하여 시험에 사용하였다 또한 시험 절차는 운할 없는 dry 조건하에서 실시하였으며(마찰계수 0.3~0.5), 500rpm의 회전속도에서 공냉(air cooling)으로 시험하였으며. 마모량의 측정은 시험전후의 시편중량을 측정하였다 중량측정의 정확도는 $\pm 0.00001g$ 이며. 슬립율은 0.1~5%까지 변화 시험하였으며 접촉하중은 400kgf와 500kgf 조건하에서 시험을 실시하였고. 시험 사이클은 5×10^5 cycles까지이며. 마모영향 인자 시험을 위하여 접촉압력과 슬립율을 변화시켜 가면서 접촉시 온도의 변화를 측정하였다.

참고로 일반적인 마모지수(wear index)는 $T\gamma/A$ 로 표현된다.(T는 접촉력, A는 접촉면적, γ 상대 슬립율). 또한 전형적인 차륜-레일 접촉에서의 마모지수($T\gamma A$)는 10 N/mm²까지이며 플랜지 접촉하에서 20 N/mm²이상을 나타낸다.

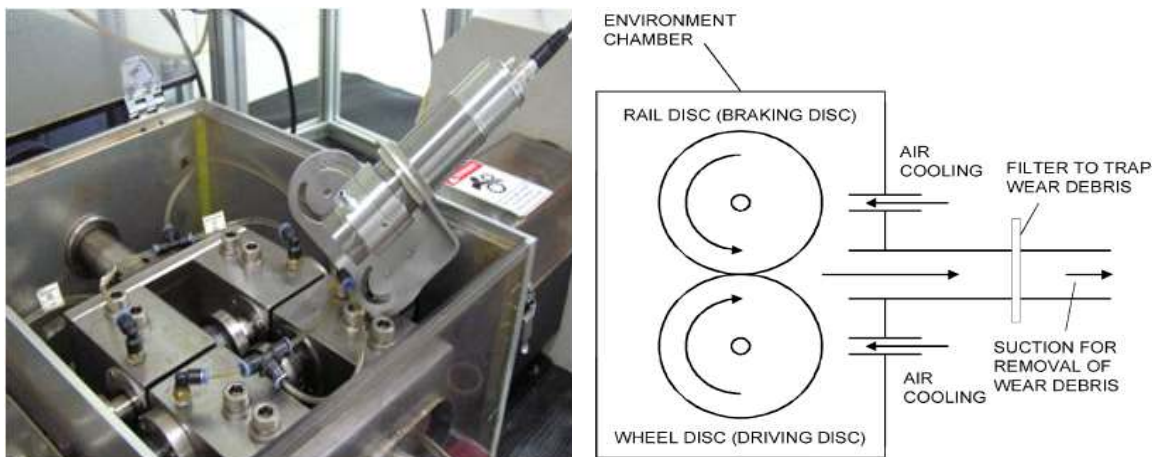


그림 8. Twin disc tester and environment chamber

4. 시험결과

4.1 슬립율에 따른 마모량의 변화

그림9에 슬립율에 따른 마모량의 변화를, 그림10은 슬립율에 따른 마찰계수의 변화를 보여준다. 그림 9에서 1 % 슬립율 까지 마모량이 급격히 증가하다가 이후에는 마모량의 변화가 미미하게 나타나는 경향을 보여준다. 그림10에서 마찰계수의 변화도 슬립율이 증가하여도 어느 범위에서는 증가가 미미하다 그러나 초기 마모단계에서는 차륜과 레일재의 거칠기 접촉 및 산화(oxidation)로 인하여 마모량이 급격하게 증가하다가 어느 정도 상대 접촉이 이루어지면 마모량의 변화가 미미하게 이루어진다. 이때 마모량의 변화가 미미하게 이루어지더라도 접촉표면은 그림11과 같이 박리가 형성되어 표면손상으로 이어지기도 한다.

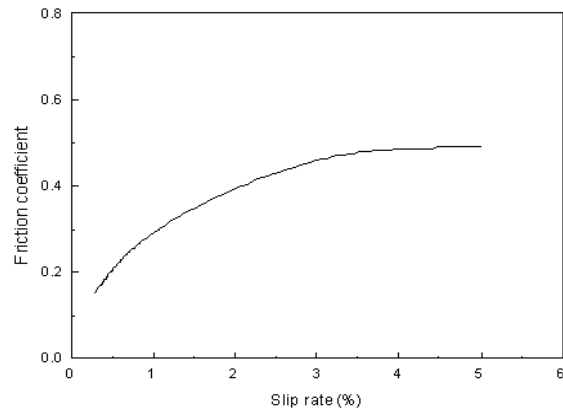
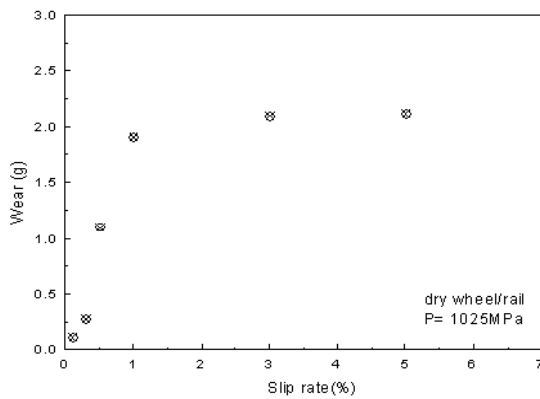


그림 9. Wear rate varying with slip rate

그림 10. Friction coefficient varying with slip rate

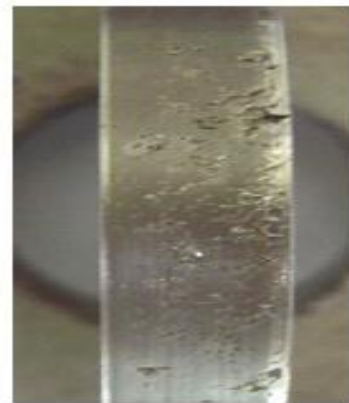


그림 11. Rolling contact damage of specimen before and after test

4.2 접촉압력에 의한 마모량의 변화

그림12 14는 접촉압력에 따른 마모량의 결과를 나타낸 것이다. 0.3%와 0.5%의 슬립조건하에서 1025MPa과 1145MPa의 접촉압력에 따른 마모량의 변화이다. 1025MPa는 일반적으로 차륜-레일 접촉 조건하에 발생하는 접촉압력이며 1145MPa은 고속도 조건하에서 발생하는 접촉압력의 조건이다. 같은 슬립율의 조건하에서 접촉압력이 증가하면 마모량도 선형적으로 증가하는 것으로 나타나며 슬립율이 증가하고 접촉압력이 높게 되면 마모량의 변화폭이 커지게 됨을 알 수 있다.

그림13은 마모시험시 차륜-레일 접촉면의 온도를 1025MPa의 접촉압력하에서 적외선 온도계를 이용하여 측정한 결과 접촉면의 온도가 최대 42°C이며 시험 cycle이 진행되는 동안에도 마모량의 증가에도 불구하고 접촉면의 온도는 그다지 변화되지 않는다.

4.3 속도함수로서의 마모량의 영향

고속도 영역에서 마찰계수는 이상적인 조건에서 속도에 따라 일정하게 유지해야 하지만 실제 마찰계수는 속도가 증가함에 따라 낮아지는 경향이다. 기존 연구에 의하면 250 km/h 이상의 고속에서는 0.1~0.2의 마찰계수를 나타낸다. 마찰계수와 슬립율의 관계는 마찰계수가

증가하면 슬립율도 증가하지만 1% 이상의 슬립율에서는 마찰계수가 변화되지 않고 일정하다. 고속도에서의 마모조건은 시험결과에서와 같이 낮은 슬립율과 높은 접촉압력의 마모조건으로 마모가 발생하지만 많은 마모량이 발생하지는 않는 조건이다. 시험 결과에서 알 수 있듯이 마모가 심한 조건은 높은 슬립율과 높은 접촉압력의 조건이다. 차륜 플랜지의 접촉조건이 이러한 상태 하에서 이루어진다고 볼 수 있다.

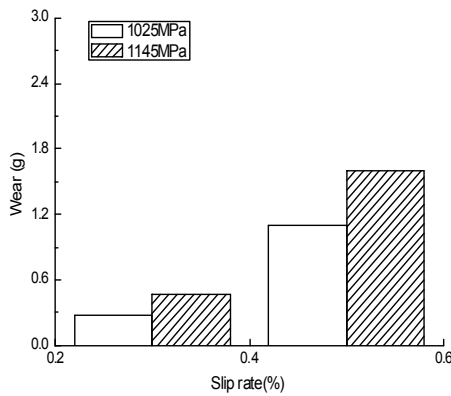


그림 12. wear rate varying with contact pressure and compared with slip rate

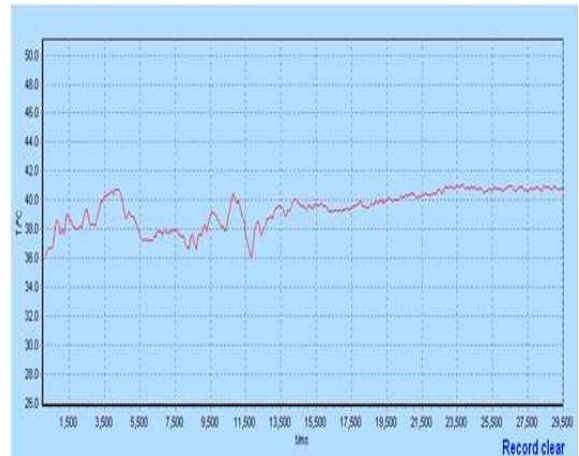


그림 13. Disc contact temperature in wear test

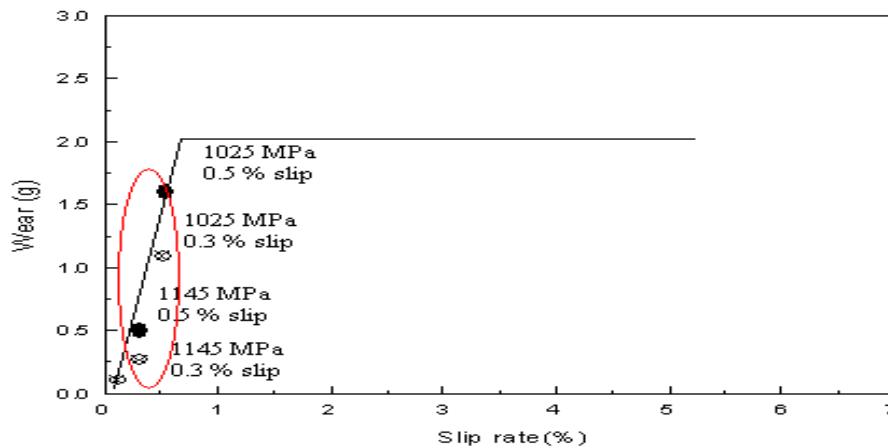


그림 14. Wear condition in high velocity

5. 결론

Twin disc 시험기를 이용하여 마모 영향인자 시험을 실시하였으며 슬립율, 접촉압력, 접촉온도 등의 변화에 따른 차륜-레일의 경계영역에서 마모 특성은 속도 보다는 슬립율과 접촉압력에 의하여 크게 영향을 받으며, 차량의 고속도에서는 낮은 슬립율과 높은 접촉압력의 조건으로 비교적 가벼운 마모 조건이며 슬립율과 접촉압력이 증가하게 되면 그에 따라 마모량이 증가하게 되며 1% 이상의 슬립율에서는 마모량이 보편적으로 증가하지 않았다. 또한 차륜의 답면의 열처리 과정에서 답면의 경도를 균일하게 유지하도록 하여야하며 인장응력 피로시험 비틀림시험 등을 실시하여 향후, 높은 슬립율과 높은 접촉압력하에서 마모특성 변화에서 연구가 더욱 필요하다.

참고문헌

1. Dearden, J., The wear of steel rails and tyres in railway service, *Wear*, vol.3, 1960
2. McEwen, I.J., Harvey, R.F., Full-scale wheel-rail testing: Comparisons with severe wear and a developing theoretical predictive model, *Lubrication engineering*, vol.41-2, 1985
3. Lewis, R., Dwyer, R.S., Olofsson, U., Hallam, R.I., Wheel material wear mechanisms and transitions, 14th International wheelset congress, 17-21 October
4. Magel, E., Tajaddini, A., Trosino M., Kalousek, J., Traction, forces, wheel climb and damage in high-speed railway operation, *Wear*, 265, 2008
5. Braghin, F., Lewis, R., Dwyer, R.S., Bruni, S., A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear, *Wear*, 261, 2006
6. 임진수, “철도 차량의 동역학 - 헌팅과 주행 문제의 역사-”, 한국소음진동공학회지, 제9권 제3호, 425~430p, 1999
7. 김형덕 역, “철도 차량기술 요원을 위한 철도차량, 검수정보(하)”, (주) 에코마스터, 2003.
8. 서울지하철공사, “전동차정비지침서” .
9. 서울지하철공사, “전동차검수규정” .
10. 양철식, “도시철도 차량의 차륜마모에 따른 횡가속도 패턴 연구 ”, 석사학위논문, 서울산업대학교, 2006.
11. 김희대의 5명, “전기철도공학”, 태영문화사, 2007.
12. 백남욱외 3명, 철도차량총서”, 기전연구사, 1997.
13. 이남진 · 김정하 · 남학기, “곡선 선로에서의 차륜담면과 레일 접촉에 대한 개념적 연구”