

철도차량 차륜의 구름접촉피로의 실험적 연구

Experimental study on rolling contact fatigue of railway wheel

서정원*, 허현무*, 이동형*, 정흥채*
Seo, Jung-Won, Hu, Hun-Mu, Lee, Dong-Hyeong, Chung Heung-Chai

ABSTRACT : Railway wheels and axles belong to the most critical components in railway vehicles. The service conditions of railway vehicles became more severe in recent years due to the increase of speed. Therefore, a more precise evaluation of wheelset life and safety has been requested. One of the major reasons of railway wheel damage is a contact zone failure by wheel/rail contact. In this paper, we conducted a rolling contact fatigue test for wheels using a specimen of wheel/rail. the behavior of hardness and residual stress below the contact surface of the test pieces in the fatigue process were analyzed. Finally, the relation between fatigue life and contact pressure was obtained.

1. 서론

최근 철도차량의 고속화에 따라 철도차량의 중요부품이라 할 수 있는 차륜과 차축의 사용조건은 점점 가혹해지고 있다. 철도차량의 경우 한번 사고가 발생하면 대단히 큰 인명피해가 발생할 수 있기 때문에 이의 방지를 위하여 신뢰성평가가 필수적이라 할 수 있다. 차륜과 레일의 접촉에 의한 손상 중 레일의 헤드 체크링(head checking) 및 스콧(squat)에 대하여는 많은 연구가 진행되어 왔다. 차륜에 대하여는 마모와 관련된 연구가 수행된바 있으며 최근에 접촉면 손상에 대한 연구가 진행중이다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

접촉피로시험과 관련하여 지금까지는 대부분 베어링, 기어 등에 관한 연구가 많이 수행되었고 철도차량의 경우에는 레일에 관한 연구가 1990년대에 많이 수행되어지고 있다. 그러나 차륜에 대한 시험 및 연구는 미비한 실정이다. 차륜에 발생하는 손상요인은 차륜/레일의 접촉응력에 의한 박리(Spalling, Shelling), 제동열에 의한 열크랙 등이 있다. 이 중에서 반복적인 접촉피로에 의해 발생하는 Spalling에 대하여 손상발생 기구 및 접촉하중에 따른 수명을 평가하기 위하여 기초적인 시험을 실시하였다. 시험편 시험을 위하여 실제 레일 및 차륜에서 시험편을 채취하였으며 접촉면의 경도를 실제조건에 맞추기 위하여 열처리를 실시하였다.



Fig. 1 차륜에 발생하는 손상

* 한국철도기술연구원, 정희원

제2절 접촉피로 시험

차륜과 레일의 접촉에 의해 발생하는 손상인 Spalling에 대한 수명 및 발생기구를 평가하기 위하여 시험편을 제작하여 시험을 실시하였다. 시험은 현재 보유하고 있는 마모시험기를 이용하고 본 시험의 목적에 맞게 지그 및 시험편을 제작하였다.

2.1 시험편 형상

Fig. 2는 시험편 채취 위치를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 차륜 시험편은 차륜의 두부에서 채취하였고 레일의 경우에는 두부에서 판부까지에서 채취하였다. Fig. 3은 차륜 및 레일 시험편의 형상을 나타내고 있으며 상호 접촉하여 시험을 실시하게 된다.

차륜시험편의 치수 및 형상은 직경이 90mm이고 두께는 16mm가 되도록하였다. 레일 시험편은 직경이 110mm이고 두께는 15mm이다. 시험시 접촉면의 접촉응력 및 시험기 하중을 고려하여 접촉면이 4mm가 되도록 하였고 레일시험편에는 접촉 시험시 마모가 되어도 일정한 접촉응력이 유지되도록 하였다.

시험편 접촉면의 경도를 일정하게 유지하기 위하여 열처리 실시하였고 접촉면의 조도를 맞추기 위하여 연삭을 실시하였다.

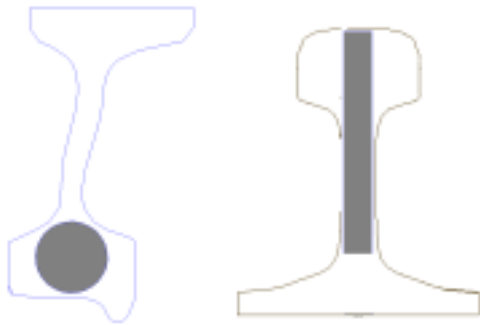


Fig. 2 시험편 채취 위치

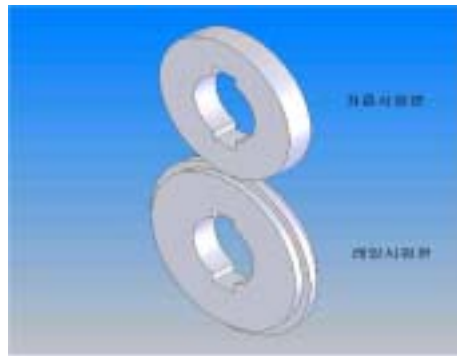


Fig. 3 시험편 형상

2.2 시험조건 및 방법

시험조건으로는 슬립율을 1%로 고정하고 접촉응력을 1000 - 1500 MPa로 변화시켜가면서 시험을 실시하였다. 균열 및 손상은 진동신호를 측정하여 진동신호가 어느 수준이상이면 시험이 정지하도록 해야하나 시험기의 기능이 되지 않으므로 50,000 싸이클 마다 시험기를 정지시켜 균열여부를 현미경으로 관찰하였다. 이때 시험기에서 작용하중, 토크, 싸이클, 진동신호를 연속적으로 데이터를 컴퓨터에 저장하도록 시험장치를 꾸며 진동신호가 커지는 순간을 손상이 발생하는 순간으로 하였다. Fig. 4는 진동센서를 시험기에 부착한 장면이다.

접촉피로시험의 경우 물이나 윤활제가 없으면 손상이 발생하지 않으므로 본 실험에서도 시험 시 연속적으로 물이 공급되도록하는 장치를 장착하였다. 윤활의 양이 수명에 영향을 미치지 않으므로 윤활 조건은 물(Water)로 하며 1초 1방울이 떨어지도록 하였다. Fig. 4는 시험장치 및 물이 공급되는 장치를 보여주고 있다.



a) 시험기 전경



b) 시험장면

Fig. 4 시험기 및 시험장면

제3절 접촉피로 시험결과

3.1 손상 형상 및 균열발생 기구

Fig. 5는 시험 실시 후 손상된 모습을 나타내고 있으며 접촉면과 비접촉면이 구별됨을 알 수 있으며 그림은 접촉면을 20배 확대한 것으로 접촉면에 많은 박리가 발생됨을 알 수 있다. Fig. 6은 시험편의 절단면에서의 균열발생 모습을 보여주고 있다. 두께의 1/2의 절단면을 폴리싱한 후 100 배 확대한 모습이다. a) 그림은 균열이 표면에서 발생하여 약 10. 방향으로 진전하고 있는 모습을 나타내고 있으며 b) 그림은 균열이 진전하여 균열 끝단면을 보여주고 있다. c) 그림은 깊이 0.3 mm 부근에서의 균열을 나타내고 있다. 일반적으로 시험편을 이용한 접촉피로시험 시 슬립율이 높거나 하중이 높을 경우에는 균열이 표면에서 발생하고 그렇지 않을 경우에는 표면 밑에서 균열이 발생한다. 본 실험에서는 항상 균열이 표면에서만 발생하는 것이 아니라 표면 밑에서도 균열이 발생 함을 보여주고 있다.



a) 시험 후 차륜 모습



b) 접촉면 확대 (X 20)

Fig. 5 시험후 차륜시험편 모습



a) 균열발생 시점



b) 균열전단



c) 내부균열

Fig. 6 균열발생 모습 (X 100)

3.2 경도 변화 및 잔류응력 변화

Fig 7은 시험 전과 시험 후의 깊이에 따른 경도 변화를 나타내고 있다. 경도의 측정은 비커스 미소 경도계를 이용하여 측정하였다. 시험 후 경도는 반복적인 접촉하중에 의하여 항복강도를 넘어서 Strain Hardening에 의하여 경도가 증가하고 있다. 최대하중이 증가함에 따라 경도의 최대값이 증가함을 알 수 있고 최대치는 0.3 - 0.4 mm 부근에서 발생하고 있다.

Fig. 8, 9는 깊이에 따른 잔류응력의 변화를 나타내고 있으며 잔류응력의 측정은 천공법을 이용하였다. 초기에는 열처리 및 연삭에 의해 잔류응력이 일정하게 -87MPa이 존재하였고 반복적인 접촉하중에 의하여 잔류응력이 변화하고 있다. 최대가 발생한 위치는 0.4 - 0.5 mm 부근에서 발생하고 있다. Fig. 9는 유한요소 해석결과와의 비교를 나타내고 있다. 이론적으로 최대잔류응력은 최대전단응력이 발생하는 위치인 0.78 a에서 나타나고 있고 슬립율이 높아질수록 표면에서 가까워진다. 해석치와 실험치의 비교에서 해석치의 경우에는 이론적인 값과 동일한 위치에서 최대 압축잔류응력이 발생하였지만 실험치의 경우에는 그 보다 약간 깊은 곳에서 발생하고 있다.

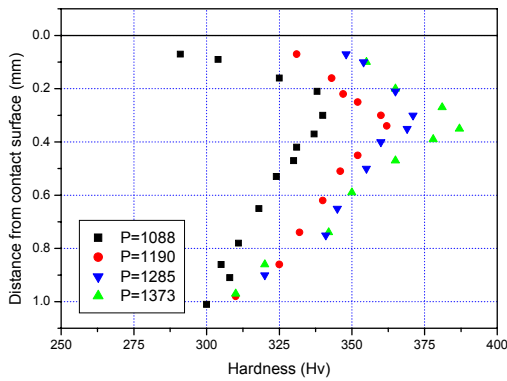


Fig. 7 깊이에 따른 경도변화

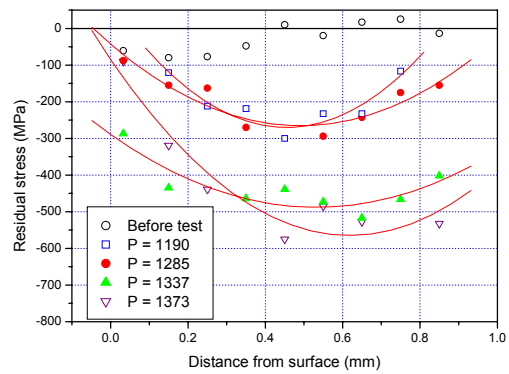
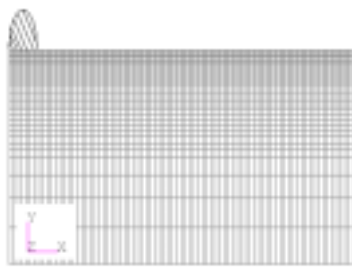
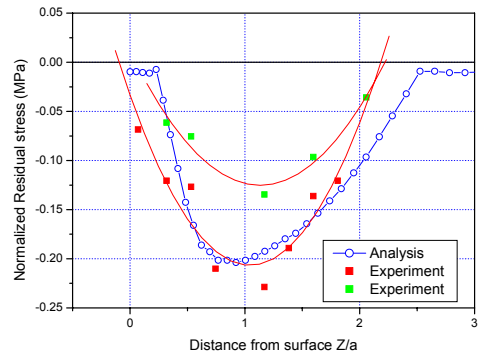


Fig. 8 깊이에 따른 잔류응력 변화



a) 해석 모델



b) 잔류응력값의 비교

Fig. 9 잔류응력 변화의 해석과의 비교

3.3 접촉압력에 따른 수명

접촉면의 최대접촉응력 및 접촉면의 계산은 다음의 식을 통하여 구할 수 있다.

$$P_0 = 0.591 \left[\frac{NE(R_T + R_B)}{2bR_T R_B} \right]^{1/2}$$

$$2a = 1.08 \left[\frac{N(R_T R_B)}{b E R_T + R_B} \right]^{1/2}$$

여기서 N : 수직하중 E : 탄성계수 b : 시험편 폭
 R_T : 레일 시험편의 직경 R_B : 차륜 시험편의 직경

접촉면에서의 마찰계수는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$f = \frac{F}{P} = \frac{T}{P \cdot r}$$

여기서 F : Traction, T : Torque of wheel piece side
 P : Radial load, r : Radius of wheel piece

Table 1은 시험결과를 나타내고 있으며 접촉응력이 커질수록 손상이 빨리 발생하는 선형적인 관계가 성립되었다. 그림은 이에 대한 결과를 그래프로 나타내고 있다. 그림에서와 같이 접촉응력이 1463MPa 일 경우에는 175,000 사이클에서 손상이 발생하였고 1190MPa에서 688,500 사이클에서 손상이 발생하였다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L = 28.84(P_0/k)^{-0.146}$$

여기서 L : No. of cycles, P₀ : 최대 접촉하중, k : 전단항복강도

Table 1 시험결과

시험편번호	초기직경 (mm)	접촉하중 (MPa)	사이클	접촉너비 (mm)	비고
1	레일	105.85	1190	688,500	0.47
	차륜	89.77			
2	레일	105.87	1285	520,790	0.51
	차륜	89.82			
3	레일	105.92	1463	175,000	0.64
	차륜	88.24			
4	레일	105.92	1337	210,000	0.58
	차륜	89.82			
5	레일	105.71	1373	260,600	0.61
	차륜	88.08			
6	레일	105.72	1088	988,000	0.48
	차륜	89.66			

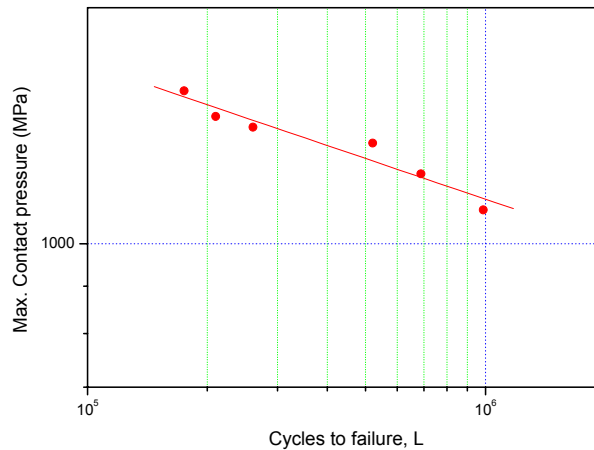


Fig. 10 접촉하중과 수명과의 관계

5. 결론

차륜의 접촉피로손상 발생 기구의 평가와 접촉압력에 따른 수명을 평가하기 위하여 시험편 접촉 피로시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반복적인 접촉하중에 의하여 표면에 손상이 발생함을 알 수 있었고 윤활이 없는 경우에는 마모가 많이 발생하여 손상이 발생하지 않았다.
2. 접촉하중에 의해하여 접촉표면에서는 항복강도를 넘어서게 되며 이에 따라 Hardening이 발생하여 경도가 증가하였고, 또한 압축잔류응력이 발생하였다. 최대 압축잔류응력의 발생위치는 접촉너비의 0.78 a 부근이었다.
3. 차륜에 대한 접촉피로시험을 실시하여 접촉하중과 수명에 대한 관계식을 얻었으며 접촉하중이 증가함에 따라서 표면 손상 발생 수명이 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 철도기술개발사업의 경제적 차륜담면관리 기술개발 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

- (1) D. F. Cannon, H. Pradier, 1996, "Rail rolling contact fatigue research by the European Rail Research Insititue", Wear 191, 1 - 13
- (2) M. Bijak-Aochowski, 1997, "Residual stress in some elasto-plastic problems of rolling contact with friction", Int. J. Mech. Sci. Vol. 39, pp 15 - 32
- (3) S. M. Kulkarni, 1991, "Elasto-Plastic FE Analysis of Repeated Three Dimensional, Elliptical rolling contact with rail wheel properties", Transactions of the ASME, Vol.113, pp 434-441.
- (4) P. Clayton, D.N. Hill, 1987, "Rolling contac fatigue of a rail steel", wear 117, pp 319 - 334
- (5) T. FUUI, K. Matsuda, 1986, "The influence of work hardening on the rolling contact fatigue strength of the stainless steel", Journal of JSLE, pp 83 - 88
- (6) T. Makino, M. Yamamoto, 2002, "Effect of material on spalling properties of railroad wheels", wear 253, pp 284 - 290