

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안정성 향상 기술

차륜 답면의 열손상에 대한 잔류응력 평가

Evaluation of Residual Stress for Thermal Damage of Railway Wheel Tread

권석진<sup>1,✉</sup>, 서정원<sup>1</sup>, 이동형<sup>1</sup>, 함영삼<sup>1</sup>  
Seok Jin Kwon<sup>1,✉</sup>, Jung Won Seo<sup>1</sup>, Dong Hyung Lee<sup>1</sup> and Young Sam Ham<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 (Vehicle and Track Research Department, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: sjkwon@krii.re.kr, Tel: 031-460-5249

Manuscript received: 2011.2.29 / Accepted: 2011.4.4

*The thermo-mechanical interaction between brake block and wheel tread during braking has been found to cause thermal crack on the wheel tread. Due to thermal expansion of the rim material, the thermal cracks will protrude from the wheel tread and be more exposed to wear during the wheel/block contact than the rest of the tread surface. The wheel rim is in residual compression stress when is new. After service running, the region in the tread has reversed to tension. This condition can lead to the formation and growth of thermal cracks in the rim which can ultimately lead to premature failure of wheel. In the present paper, the thermal cracks of railway wheel, one of severe damages on the wheel tread, were evaluated to understand the safety of railway wheel in running condition. The residual stresses for damaged wheel which are applied to tread brake are investigated. Mainly X-ray diffraction method is used. Under the condition of concurrent loading of continuous rolling contact with rails and cyclic frictional heat from brake blocks, the reduction of residual stress is found to correlate well with the thermal crack initiation.*

Key Words: High Speed Train (고속철도), Wheel Tread (차륜 답면), Thermal Crack (열균열), Residual Stress (잔류응력), Crack Tip (균열선단)

1. 서론

철도차량의 차륜은 레일 위를 주행 하면서 여러 가지 복잡한 하중조건 하에서 운영되고 있으며 차륜의 부분적인 손실이나 파손은 막대한 경제적, 사회적 피해를 동반하는 탈선사고를 발생시킬 수 있기 때문에 차륜에 대한 안전성 평가가 필수적이라 할 수 있다.

차륜의 품질성능에 대해서는 국내의 규격뿐만 아니라 차륜 제조회사에서도 별도로 관리를 실시하고 있는 실정이지만 지속적인 철도차량의 성능

향상과 더불어 운행 하중조건이 가혹화 되어 유럽, 일본, 미국 등에서는 차륜에 대한 품질성능을 강화하거나 유지보수 기준 강화, 새로운 차륜 재질 개발 등을 추진해 나가고 있다.

철도차량 답면제동식 차륜에서의 균열발생과 진전은 반경방향 또는 보스부, 차륜 판부의 중앙부, 차륜 림부에서 시작되는 경우가 많으며 보다 심한 하중 조건하에서 파손될 수 있다. 이러한 차륜 파손의 결과로써 철도차량의 탈선 또는 인명손상, 경제적 피해 등을 발생시킬 수 있다.

AAR 에서는 차륜파손에 의한 탈선사고가

25~30 %에 이르다고 보고하였으며 유럽철도에서는 사고비율이 50 %에 이르다고 하였다. 이러한 탈선 사고에 의한 경제적 비용은 평균적으로 30,000 \$에 달하며, 심지어 백만불에 달하는 경우도 있다. 1990 년대 초기 북미에서 영업운행 중인 차륜의 파손으로 인한 탈선사고가 빈번히 발생되었으며, 이는 담면제동에 의해 차륜이 심각한 열손상을 받게 되어 발생한 것으로 보고되었다.<sup>1,2</sup>

이와 같이 차륜파손에 의한 탈선사고는 경제적, 사회적으로 영향을 많이 미치게 되기 때문에 차륜에 대한 품질규격의 강화는 물론 안전성 평가가 진행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 고속차량의 담면제동식 차륜의 열손상에 대하여 잔류응력에 대한 측정을 수행하였으며, 차륜의 안전성에 대한 평가를 실시하여 주행 조건에서의 안전성에 대한 자료 제공을 목적으로 본 연구를 수행하였다.

## 2. 차륜의 잔류응력과 열손상

차륜의 신제작시 잔류응력은 초기에 열처리의 영향으로 압축 잔류응력이 존재하게 된다. 철도차량이 급구배의 경사를 하행할 경우 가속을 방지하기 위하여 역속 제동을 하게 되며 하구배를 장시간 주행할 경우 차륜은 상당한 가열을 받게 된다. 또한 제동장치가 고장나거나 불량 완해된 상태로 장시간 주행할 경우도 있다. 이 경우에도 차륜은 가열되게 된다.

이러한 경우에 가열된 온도가 높게 되면 차륜에 재료의 항복점을 초과한 압축 열응력이 발생하고 그 결과 압축 잔류응력이 존재하였던 차륜이 인장 압축응력 상태로 변하게 된다. 이와 같이 차륜에 인장 압축응력이 발생하게 되면 차륜담면에 발생된 작은 열균열이 내부로 진전하기 쉽게 되고, 인장응력이 크게 되면 균열을 기점으로 차륜은 취성적인 파괴를 발생시킬 우려가 있다.<sup>3,4</sup>

차량의 주행안전성을 확보하기 위하여 차륜에 큰 인장 잔류응력이 발생하는 것을 방지해야 한다. 이 때문에 차륜에 발생하는 인장 잔류응력을 경감시키는 것이 제일 큰 문제라고 할 수 있다.

차륜의 제작과 관련하여 기계적, 야금학적인 요구조건 중의 하나가 잔류응력이다. 차륜의 접촉면에 압축 잔류응력을 발생시켜 균열의 발생 및 진전이 발생하지 않도록 하여야 한다. 원주방향의 압축잔류응력은 차륜의 피로수명을 연장하는데 큰

기여를 한다.<sup>5-7</sup>

차륜과 레일의 구름접촉시 차륜 및 레일이 견인력, 제동, 곡선 등의 높은 마찰력을 반복적으로 받을 때 차륜 표면은 소성 변형이 발생한다. 이와 같은 현상이 반복될 때 미시적으로 차륜표면이 변형되어 균열 등의 손상이 발생한다. 즉, 재료의 경화와 잔류응력이 소성변형의 누적을 충분히 방해하지 못하면 차륜 파손이 발생한다.

최근 철도차량의 고속화와 더불어 가혹한 제동 조건하에서 운행되면서 차륜 담면에서 열균열의 발생이 증가하고 있다.<sup>8</sup> Fig. 1 은 제동회수의 증가에 따라 차륜 표면의 열변색으로 열손상이 발생하는 상태를 보여주고 있다.

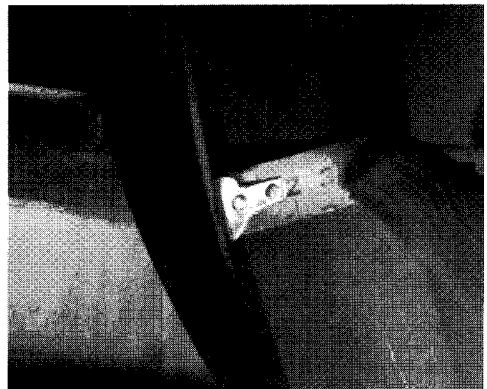


Fig. 1 Thermal damage of wheel

일본의 RTRI 에서는 제동 다이내모 시험기를 이용하여 열균열의 발생시험을 실시하였다. 252 MJ 의 제동누적 에너지와 60 회 제동의 조건하에서 열균열이 발생되고 있음을 보고하였다.<sup>9</sup>

이의 시험에서 구름접촉의  $1.2 \times 10^6$  cycles 에 해당하는 130 회 제동 후에 관찰된 열균열은 주요 3 가지 형태인 주요 균열, 중앙 균열과 미세한 균열로 분류될 수 있다. 주요 균열의 가로길이는 대략 차륜과 레일의 접촉 폭에 해당하는 25~30mm 이었으며 이러한 균열이 표면에서 발생하여 인접한 균열과 미세한 균열들이 합쳐하여 차륜관부 쪽으로 진전하게 된다.

제동 시험 후 가시화된 균열의 발생과 진전이 차륜-레일의 접촉 폭 이외는 관찰되지 않았다는 사실은 단독으로 열사이클에 의해 균열이 발생하고 진전할 가능성이 없다라고 하였다. 따라서 반복적인 열사이클과 높은 구름접촉압력은 차륜 담면의 균열 발생에 대한 필요 조건이다라는 것은 분명하다.

### 3. 시험방법 및 절차

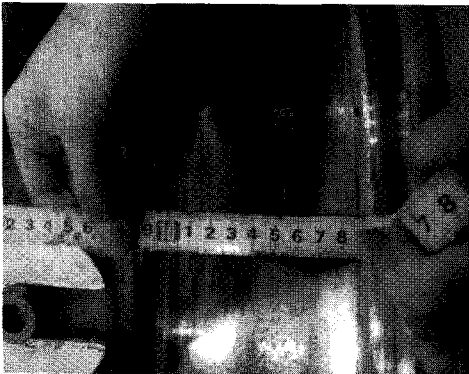
#### 3.1 시험편

시험편은 실제 운영되는 철도차량 차륜에 대하여 잔류응력을 측정하였으며 열손상 차륜과 신제 차륜을 비교하여 잔류응력을 평가하였다.

Fig. 2 는 잔류응력 측정시험편의 측정방향과 측정위치를 보여준다. 잔류응력은 차륜 림부에서 차륜 플랜지 방향으로 측정하였으며 차륜 표면에 대하여 측정하였다.



(a) Direction of measurement scanning



(b) Measurement location

Fig. 2 Railway wheel for specimen

#### 3.2 측정방법

잔류응력 측정은 차륜담면의 표면에서 림부를 기준으로 20 mm 이내 위치에서 시험을 수행하였다. Fig. 3 은 차륜 표면에서 잔류응력을 측정하는 모습을 보여준다.

잔류응력 측정방법에는 천공법(punching), 절단에 의한 스트레인 게이지 측정법(strain gage), 초음파(ultrasonic)를 이용한 측정법 등이 있으며 차륜

에 대한 국제 표준규격(UIC 810-1, BS EN 13262)에 서는 절단에 의한 스트레인 게이지 방법과 초음파 방법을 권장하고 있다.<sup>10</sup>

본 연구에서는 Fig. 3 과 같은 X 선을 이용한 측정 장치를 이용하여 고속철도 동력차의 왼쪽과 오른쪽 차륜을 측정하였다.

차륜에서의 잔류응력의 측정은 원주방향으로 90°간격으로 차륜을 회전하여 측정하였으며 X 선 조사 각도는 -45°~45°로 측정한 결과를 나타낸 것이다. Table 1 는 차륜 잔류응력 측정시의 측정조건을 나타낸 것이다.

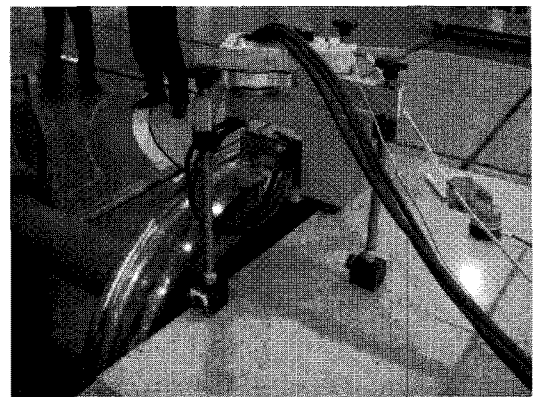


Fig. 3 Railway wheel for specimen

Table 1 Test conditions

Test condition	$\alpha$ -Ferrite
Characteristic X-ray	Cr-K $\alpha$
Diffraction plane	[211]
Diffraction angle	156.4°
No. of Oscillation	-
Irradiated area	$\Phi 3$
Time constant	5~25 sec

차륜의 잔류응력 측정장비는 XSTRESS 3000(Stresstech 社)가 사용되었으며 잔류응력의 측정 방향은 원주방향의 잔류응력을 측정하였다. 또한, X 선 회절조건은 응력측정법에 따라 회절피크 이동을 회절각 2 $\theta$ 로 측정하고,  $\pm$ 방향으로 각각 5 회( $\psi = 0^\circ, 20.7^\circ, 30.0^\circ, 67.8^\circ, 45^\circ$ ) 기울여(tilting) 격자간격  $d$  를 측정하여  $d \cdot \sin^2 \psi$  법으로 잔류응력을 측정하였다.

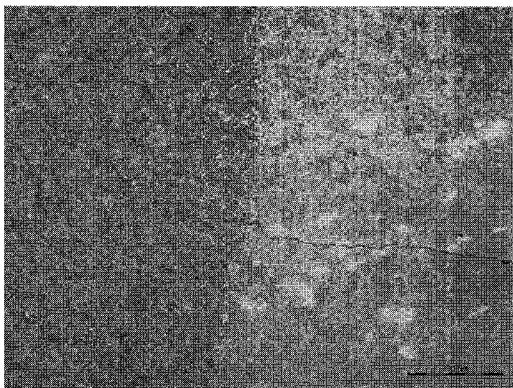
### 4. 시험결과 및 고찰

#### 4.1 차륜표면의 조직

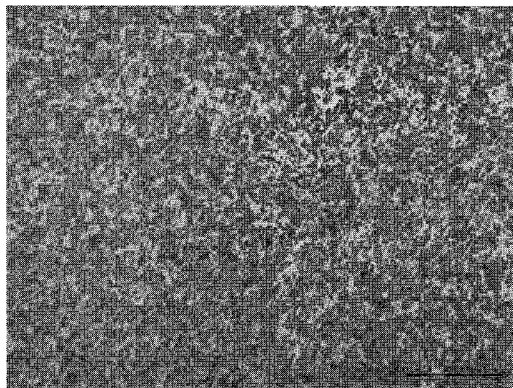
Fig. 4 는 철도차량의 차륜의 마찰면에 대한 비파괴 조직검사인 레프리카(replication test) 검사 결과를 보여준다.

Fig. 4(a)에서 차륜 림부를 기준으로 림부쪽에 가까울수록 재료자와의 마찰에 의한 변형이 가장 심한 부분에서 용점 근처까지의 급격한 온도 상승과 냉각에 의해 차륜표면에 형성된 백색층(White layer)에 망상형 균열이 발생하는 현상을 볼 수 있다. 이 부분은 재료자와의 마찰열이 가장 강하게 작용된 것으로 보이며, 측면의 열변색이 심하게 발생한 주요 요인으로 작용한 것으로 추정된다.

Fig. 4(b)는 차륜 표면에서 열손상을 받지 않은 부위의 표면 조직 검사결과이다. 이러한 부분과 비교하여 열손상에 의한 차륜 표면은 마찰열에 의해 재결정층이 형성되고 있으며, 레일과의 마찰에 의해 조직이 변형되고 균열이 발생되고 있었다.



(a)Microstructure of damaged wheel



(b)Undamaged wheel

Fig. 4 Replication test results for railway wheel

#### 4.2 차륜표면에서의 잔류응력 변화

Fig. 5 는 차량 진행방향에 대하여 왼쪽 차륜의 잔류응력 측정결과를 보여주고 있다. 측정결과 차륜 림부(back face)를 기준점으로 2.5 mm 떨어진 차륜 표면의 측정 위치에서 86.9 MPa 의 인장 잔류응력이 분포하고 있었으나 대부분의 측정위치에서는 압축 잔류응력을 나타내고 있었다.

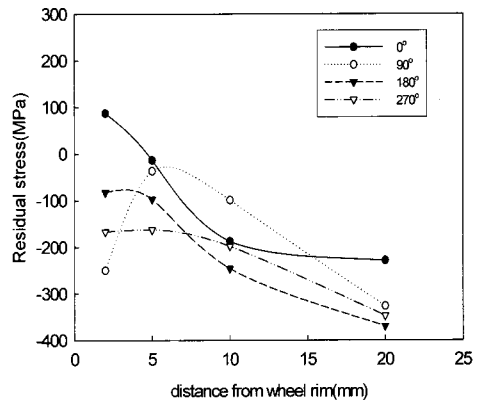


Fig. 5 Residual stress of left side wheel

차륜 림부에서 20 mm 떨어진 위치에서는 차륜 제조 초기의 잔류 응력값과 유사한 값을 나타내고 있었다. 이러한 경향은 Fig. 6 의 측정결과와도 유사하며 차륜 림부쪽에 가까울수록 재료자와 마찰열과 레일과의 전동열에 의해 잔류응력값은 초기치에 비하여 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 6 은 차량 진행방향에 대하여 오른쪽 차륜의 잔류응력과 신재(new wheel)에서의 잔류응력 측정결과를 보여주고 있다. 신재의 잔류응력은 -200 MPa ~ -300 MPa 의 압축잔류응력을 나타내고 있으며 손상 차륜의 경우 전체적으로 신재차륜에 존재하였던 압축 잔류응력이 점차적으로 감소하고 있다.

Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 최대 인장 잔류응력은 림부쪽을 기준으로 6 mm 떨어진 위치에서 117.6 MPa 이 발생하였고 전반적인 경향은 Fig. 5 의 결과와 유사하였다. 즉 열손상을 받은 부위에서의 잔류 응력값은 인장 잔류 응력값이 나타나거나 제조 초기에 존재하였던 압축 잔류 응력값보다 감소하였다.

그러나, 이러한 측정결과에서 UIC 차륜교환 기준인 300 MPa 을 초과하는 인장 잔류응력이 나타나지 않았다.

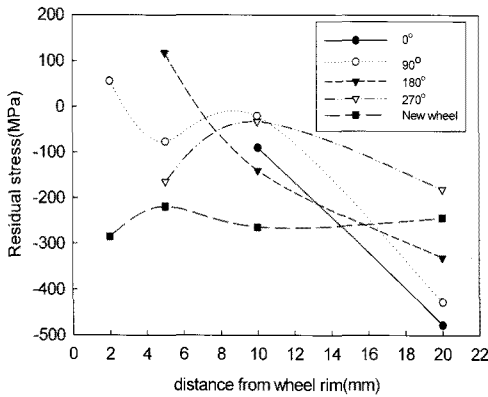


Fig. 6 Residual stress of right side wheel

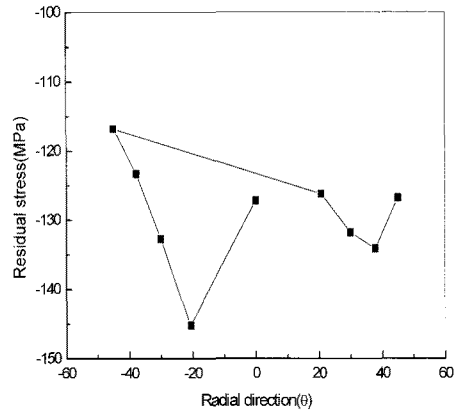


Fig. 8 Residual stress at crack tip

### 4.3 균열선단(crack tip)에서 잔류응력변화

Fig. 7 은 차륜담면 표면에 발생한 열균열을 나타낸 것이다. 열균열이 발생한 위치에서 잔류응력의 변화를 분석하기 위하여 열균열의 crack tip에서 잔류응력을 측정하였다.

측정위치는 차륜 림부를 기점으로 1.5 mm에서 잔류응력을 측정하였다. Fig. 8 은 crack tip에서 잔류응력을 측정결과를 보여준다. 조사각도에 따라 잔류응력의 변화를 보여주고 있으며 crack tip에서 잔류응력은 123.9 15.9 MPa의 압축 잔류응력을 나타내고 있었다. 일반적으로 균열발생의 조건은 냉각과 가열이 반복되면서 인장 잔류응력하에서 발생하지만 열균열의 선단에서는 인장 잔류응력이 나타나지 않았다.

이와 같이 열균열이 발생된 차륜에서 압축잔류응력이 발생하고 있으며 이것은 차륜 표면에서 열손상을 동반하더라도 차륜의 열부하 한계조건을 초과하지 않으면 안전성에 문제점이 발생되지 않는다는 것을 의미한다.



Fig. 7 Thermal crack

### 5. 결론

열손상 차륜의 마찰면에 대하여 잔류응력을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 열손상 차륜에서 림부(back face)를 기준점으로 인장 잔류응력이 림부쪽에 가까운 위치에서 분포하고 있었다.
- 2) 열손상 차륜에서 인장 잔류응력이 존재하지 않아도 차륜 표면에서는 열균열이 발생하고 있다. 이러한 균열 발생은 제륜자(brake block)와의 제동 마찰열과 레일과의 구름접촉피로(rolling contact fatigue) 손상에 의한 것으로 생각된다.
- 3) 열균열이 발생된 차륜에서 원주방향의 잔류응력이 압축 잔류응력으로 나타났으며 열손상이 나타난 차륜일 경우라도 열부하를 넘지 않으면 안전성에 영향이 없다.

### 참고문헌

1. Orringer, O., Gray, D. E. and McCown, R. J., "Evaluation of Immediate Actions Taken to Deal with Cracking Problems in Wheels of Rail Commuter Cars," Final Report, DOT/FRA/ORD-93/15, 1993.
2. Gordon, J., Jones, J. A., and Perlman, A. B., "Evaluation of Service-Induced Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels," ASME IMECE RTD, Vol. 15, 1998.
3. Ekberg, A. and Kabo, E., "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading - an overview," Wear, Vol. 258, No. 7-8, pp. 1288-1300, 2005.

4. Seo, J. W., Kwon, S. J., Jun, H. K. and Lee, D. H., "Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 7, pp. 2493-2507, 2009.
5. Moyar, G. J. and Stone, D. H., "An analysis of the thermal contributions to railway wheel shelling," *Wear*, Vol. 144, No. 1-2, pp. 117-138, 1991.
6. Lundén, R., "Contact region fatigue of railway wheels under combined mechanical rolling pressure and thermal brake loading," *Wear*, Vol. 144, No. 1-2, pp. 57-70, 1991.
7. Edel, K.-O. and Boudnitski, G., "Fracture mechanical fatigue analysis of railway wheels with rolling defects," *European Structural Integrity Society*, Vol. 22, pp. 125-133, 1997.
8. Kwon, S. J., Lee, D. H., Seo, J. W. and Kwon, S. T., "Evaluation of Residual Stress of Railway Wheel Regarding to Deterioration," *Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 2495-2498, 2010.
9. Handa, K., Kimura, Y. and Mishima, Y., "Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat," *Wear*, Vol. 268, No. 1-2, pp. 50-58, 2010.
10. Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J. and Seo, J. W., "The Experimental study about a correlation between the derailment coefficient of the railway vehicle and track alignment," *Journal of the Korean Society for the Precision Engineering*, Vol. 27, No. 8, pp. 7-12, 2010.