

◆ 특집 ◆ 철도차량 인터페이스부의 성능향상 기술

## 마모와 제동에 의한 화차륜의 잔류응력 변화

### Evaluation of Residual Stress for Freight Car Wheel due to Wear and Brake Application

권석진<sup>1,✉</sup>, 서정원<sup>1</sup>, 김민수<sup>2</sup>  
Seok Jin Kwon<sup>1,✉</sup>, Jung Won Seo<sup>1</sup>, and Min Soo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 신교통연구본부 (New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

<sup>2</sup> 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 (Metropolitan Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: sjkwon@krii.re.kr, Tel: +82-31-460-5249

Manuscript received: 2016.5.2. / Revised: 2016.6.15. / Accepted: 2016.6.21.

*During the past few years, several incidents of freight car wheel failure during operation have occurred due to fatigue crack and overheating from braking. Tensile residual stress on the wheel tread creates an environment conducive to the formation of thermal cracks that may threaten the safety of train operations. It is important to investigate the residual stress on wheels in order to prevent derailment. In the present paper, the residual stress on wheels is measured using the x-ray diffraction system and the residual stress is analyzed using FEM. The result shows that the residual stress on the wheel rim is lower than that on the wheel tread center and the stress on over-braked wheels changes from compression residual stress to tensile residual stress.*

KEYWORDS: Wheel tread (차륜담면), Residual stress (잔류응력), Railway brake (철도제동), Freight wheel (화차륜)

#### 기호설명

$\eta$  = Heat-Partitioning factor

$\mu$  = Friction coefficient

$P_o$  = Braking pressure (Pa)

$\omega$  = Angular velocity (rad/sec)

$t$  = Braking time (sec)

#### 1. 서론

철도차량 차륜과 레일의 구름접촉에서 차륜 및 레일이 견인력, 제동, 곡선 등의 높은 마찰력을 받

복적으로 받을 때 차륜 표면은 소성변형이 발생한다. 이와 같은 현상이 반복될 때 미시적으로 차륜 표면이 변형되어 균열 등의 손상이 발생한다. 즉, 재료의 경화와 잔류응력이 소성변형의 누적을 충분히 방해하지 못한다면 차륜 파손 발생의 원인이 된다.

철도용 화차의 경우 차륜표면에 직접 제동을 가하는 담면 제동방식을 사용하고 있다. 화물의 중하중과 장기간 운행 중 제동 마찰열의 반복, 냉각에 의하여 차륜손상이 발생할 수 있으며, 차륜 손상에 따른 철도차량의 탈선은 복구 비용과 운행 정지로 인한 운행 수입 등의 경제적 피해 등을 받

생시킬 수 있다.<sup>14</sup>

철도차륜의 손상모드에 대하여 많은 연구자들이 연구를 진행하였다. Cameron과 Steven는 화차하중이 무거울수록 차륜에 가해지는 접촉응력의 증가로 손상도가 증가할 수 있으며 제동 다이내모 시험에 의한 역속 제동시험 (Drag Brake Test)에서 제동력의 증가와 차륜온도가 상승되면 차륜의 잔류응력이 감소된다는 결과를 보고하였다.<sup>5</sup> Gordon과 Benjamin은 차륜 제조시와 운용조건에 따라서 차륜의 잔류응력 변화를 시뮬레이션 하였으며 Rossmanith 은 장시간 제동이 차륜에 가해질 경우 인장잔류응력 상태로 변화됨을 해석하였다.<sup>6,7</sup> Seo 등은 제동조건에 따라 잔류응력 변화가 동일한 경향으로 변화되며 잔류응력의 변화량이 40 MPa에서 60 MPa 변화됨을 해석하였다.<sup>8</sup> Handa 등은 제동다이내모 시험기를 이용하여 답면방식 차륜에 견인력과 제동력이 가해지면서 열균열이 발생한다고 보고하였다.<sup>9</sup> 최근 국내에서도 운행 중인 화물열차에서의 차륜파손으로 인한 탈선사고가 발생한 경우가 있었다. 국토해양부 항공철도사고조사위원회 보고서에 의하면 차륜이 파손되는 패턴은 피로누적에 의한 취성 파손과 제동시 마찰열의 열응력 변화에 의한 차륜 절손의 형태로 나타나고 있다.<sup>10</sup>

본 논문에서는 차륜의 손상원인에 대한 여러 영향인자 중에서 잔류응력에 대한 분석과 평가를 실시하였으며 주행마모와 제동에 따른 화차용 차륜의 잔류응력의 변화를 FEM 해석과 X선 잔류응력측정 시스템을 이용하여 측정 비교 평가하였다.

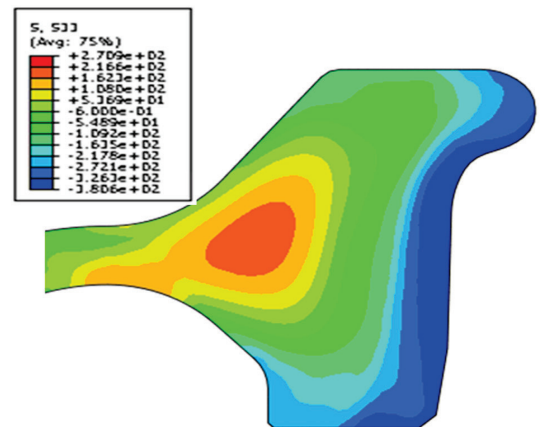
## 2. 차륜의 잔류응력 해석

### 2.1 차륜의 잔류응력

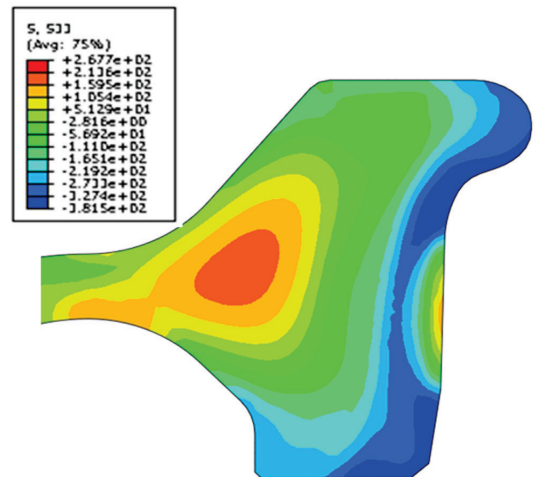
차륜잔류응력 변화에 대한 메커니즘은 차륜표면에 제동작용 여부에 의하여 차륜 마찰면에 가열, 냉각이 반복되는 현상에서 기인한다. 일반적으로 제동은 차륜의 성질과 형상 큰 영향은 없지만, 긴 내리막 경사에서의 역속 제동과 브레이크 장치에 의해 차륜 림부 (Wheel Rim) 전체가 가열 팽창한다. 이에 따라 차륜 림부가 차륜 판부 (Wheel Plate)를 외주 방향으로 당겨서 차륜 판부에 반경 방향의 인장응력이 발생한다. 이 열응력이 차륜 판부 재료의 항복점을 넘는 수준에 도달하면 차륜 판부는 소성 변형에 의해 외주방향으로 늘어나게 된다. 이후 제동이 해제되어 차륜이 냉각되면 차륜 림부는 수축하려고 하지만, 변형된 차륜 판부

가 방해가 되어 수축될 수가 없다. 그 결과, 차륜 판부가 림부를 바깥쪽으로 누르는 상태가 되어 차륜림부에 인장 응력이 발생한다.<sup>11</sup> 차륜림부는 제조시 열처리에 의해 압축 잔류응력을 부여하고 있다. 이러한 메커니즘에 의해 잔류응력이 압축에서 인장으로 바뀌어 버리는 경우가 있다. 일단 이 상태가 되면 차륜담면에 존재하는 미세한 열균열이 진전을 시작하고 심한 경우는 차륜 파손이 발생할 수 있다.<sup>12</sup>

철도차륜은 초기 제조시와 비교하여 주행거리 에 따른 마모영향과 제동이 작용하면서 차륜표면 상태는 많은 변화를 겪게 된다. 본 절에서는 차륜 제조시와 제동작용시의 잔류응력변화에 대하여 유한요소해석을 수행하여 그 변화를 평가하였다.



(a) New wheel



(b) Brake application wheel

Fig. 1 Variation of residual stress of wheel

**2.2 차륜 잔류응력의 FEM 해석**

Fig. 1은 차륜의 잔류응력상태를 FEM 해석결과에 의해 추정한 결과이다. 화차륜 모델에 대하여 열전달해석을 수행하고 이후에 열응력 해석을 수행하였으며 해석모델, 해석절차와 조건은 참고문헌 [13]을 참조하였다.<sup>13</sup> 열전달해석의 최대칭요소는 DCAX4, 요소수는 739개, 절점수는 811개이며, 열응력 해석은 최대칭 요소 CAX4, 요소수는 739개, 절점수는 811개는 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 ABAQUS이며 마찰 접촉면에 작용하는 열유속 (Heat Flux)는 다음 식과 같이 표현된다. (식(1))

$$q(r,t) = \eta \mu P_o \omega(t)r \quad (1)$$

Fig. 1(a)는 차륜제조과정 중의 잔류응력 분포를 나타낸 것이고 Fig. 1(b)는 답면제동 중의 열하중을 가하여 해석을 한 결과이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 신재 차륜에서는 차륜표면에서 압축잔류응력이 분포하며 운행 중의 제동이 가해지면서 제동 열하중에 의하여 인장 상태로 바뀌어지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 피로균열(또는 열균열)을 발생시킬 수 있으며 이러한 균열이 성장하면서 차륜 파손에 도달할 수 있는 가능성이 있다.

**3. 잔류응력 측정 시험방법**

**3.1 차륜 시험편**

차륜의 잔류응력 측정을 위하여 국내에서 운용중에 있는 Fig. 2와 같은 화차용 차륜을 대상으로 시험을 실시하였다.

시험차륜은 마모한도 차륜, 일정거리 주행 차륜, 제동시험을 실시한 차륜을 대상으로 잔류응력 변화를 측정하였다. 주행차륜은 차륜마모 직경에

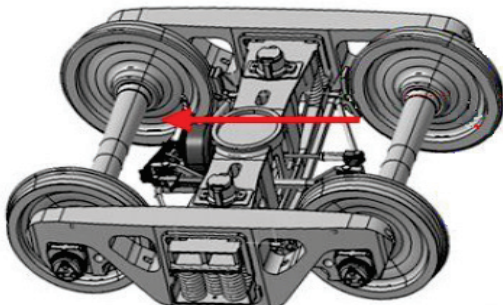


Fig. 2 Freight wheel for test

따라 구분하였으며 잔류응력 측정은 차륜 표면을 측정하여 비교하였다.

Fig. 3은 차륜 답면에서의 잔류응력 측정 위치이다. 차륜 플랜지를 기점으로 A 위치 (110 mm), B 위치 (135 mm)에서 X선을 조사하여 차륜표면의 잔류응력을 측정하였으며 차륜의 원주방향으로 90° 간격으로 잔류응력을 측정하였다.<sup>12</sup>

**3.2 측정장치와 방법**

잔류응력을 측정하는 방법에는 천공법, 절단에

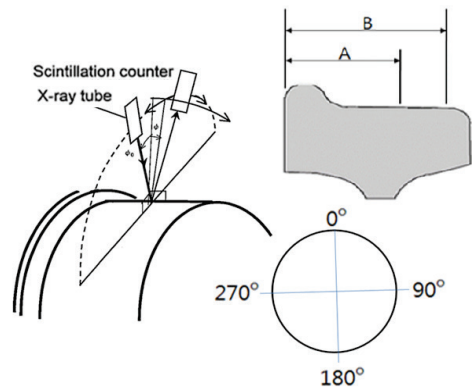


Fig. 3 Measuring points for residual stress

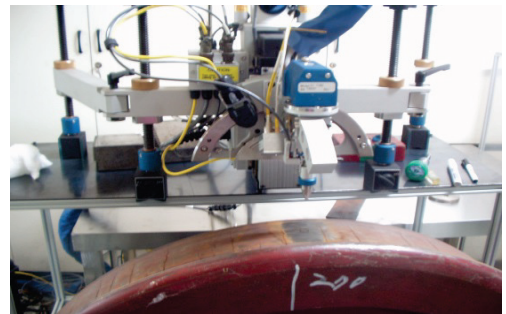


Fig. 4 Measurement using X-ray diffraction

Table 1 Test conditions for residual stress

Item	Condition
X-ray	Carbon steel (211,Cr)
Filter	Cr
Diameter of beam (mm)	3
Tube voltage (kV)	25
Tube current (mA)	0.8
Degree of beam	-45° to 45°, 25°step
Measurement time (sec)	60
Degree of bracket	156

의한 스트레인게이지 측정법, 초음파나 중성자를 이용한 측정법 등이 있다.<sup>14,15</sup> 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 X-ray Diffraction System (TEC4000, TEC)을 이용하여 시험을 수행하였다.

차륜에서의 잔류응력의 측정은 원주방향으로 회전하면서 측정하였으며 X선 조사 각도는 -45°에서 45°로 25° 간격으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 차륜의 잔류응력에 대한 측정결과는 각각 3번씩 측정하여 평균값을 비교하였으며 오차율은 ±5MPa이다. Table 1은 차륜 잔류응력 측정시의 측정조건을 나타낸 것이다.

#### 4. 차륜 잔류응력 측정결과 및 고찰

##### 4.1 차륜 마모에 따른 잔류응력 변화

Fig. 5은 직경  $\Phi 860$  mm 직경 신제 차륜의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 신제 차륜에서 잔류응력의 분포는 측정위치와 무관하게 -400 MPa에서 -500 MPa 범위의 압축잔류응력을 나타내고 있다. 앞서 Fig. 1(a)에서 해석된 제조시 차륜표면의 압축 잔류응력이 -200에서 -400 MPa 인 수치와 비교하여 비슷한 경향의 값을 나타내고 있다. 해석과 시험과의 차이는 제조사의 열처리방법에 의한 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

Figs. 6과 7은 차륜직경변화에 따른 잔류응력의 분포도를 측정한 결과이다. Fig. 6는 마모한도에 가까운 782 mm 직경의 차륜에서의 원주방향으로의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 원주방향에서의 잔류응력 분포도를 측정하기 위하여 45° 간격으로 측정한 결과 일정한 경향을 보이지는 않았다. Fig. 7에서와 같이 806 mm 직경 차륜의 경우, 원주방향에 따라 -270 MPa에서 -470 MPa의 압축응력 분포

도를 나타내었으며 압축잔류응력이 감소되거나 증가되는 영역이 원주방향에서 존재하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 경향은 신제 차륜이 일정한 압축잔류응력을 나타내는 것과 달리 운행 중의 제륜자와 레일과의 마찰전동에 의해 불균일한 차륜 표면에서의 잔류응력분포도에 기인한 것이라 추정할 수 있다. 또한, 잔류응력 측정위치인 차륜담면 중앙부 (Position A)보다 차륜립부 (Position B)에 가까울수록 잔류응력 값이 감소되는 경향을 나타내었다.

Figs. 6과 7에서의 측정결과 차륜의 잔류응력은 주행거리에 따라 현저하게 변화되는 특성이 관찰되지 않지만 운행 중 제동과 마모에 의해 차륜직경 감소에 따라 차륜의 압축잔류응력이 점차적으로 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 차륜 담면중앙부쪽 보다는 차륜 립부쪽에서 압축 잔류응력이 감소되고 있음을 알 수 있으며 차륜 립부쪽에 파손에 대하여 더 취약함을 알 수 있었다.

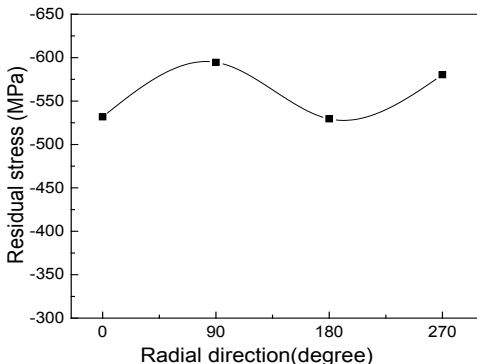


Fig. 5 Residual stress of new wheel ( $\Phi 860$  mm)

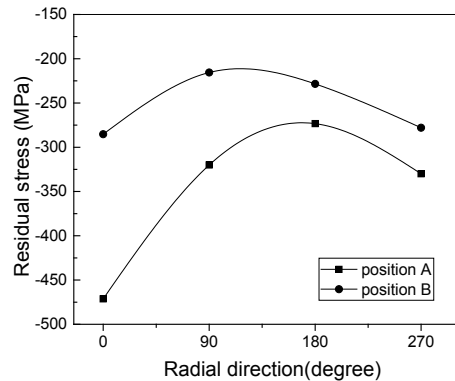


Fig. 6 Residual stress for  $\Phi 782$  mm wheel

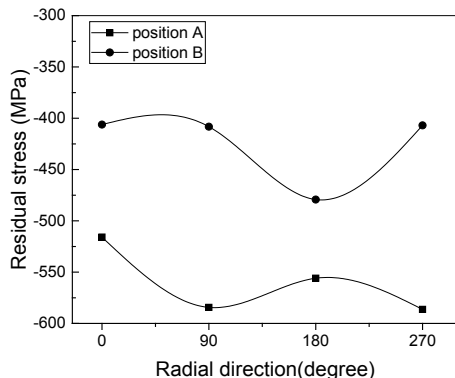


Fig. 7 Residual stress for  $\Phi 806$  mm wheel

### 4.2 손상 차륜의 잔류응력 변화

Fig. 8는 손상된 차륜 2개를 대상으로 차륜표면의 잔류응력을 측정된 결과이다. 차륜립부를 기점으로 원주방향 10° 간격으로 측정하였다. 전체적으로 인장잔류응력은 측정되지 않았지만 초기 제작시 존재하였던 -400 MPa에서 -500 MPa의 잔류응력 수치에 비하여 -150 MPa에서 -250 MPa로 감소되는 잔류응력 값이 측정되었다. 이것은 차륜이 장기간 주행 시 제동마찰열의 반복적인 가열, 냉각이 누적되면서 나타나는 변화라 생각된다.

### 4.3 제동시험 차륜의 잔류응력 변화

Fig. 9는 실물 제동다이내모 시험기 (Brake Dynamo Tester)에서 많은 제동시험을 실시하여 차륜담면 표면에 열균열이 발생한 차륜을 대상으로 잔류응력을 측정된 결과이다. 운행 중의 차륜과 달리 다이내모 시험에 의한 과제동 차륜에서는 압축 잔류응력이 아닌 인장 잔류응력이 분포하고 있

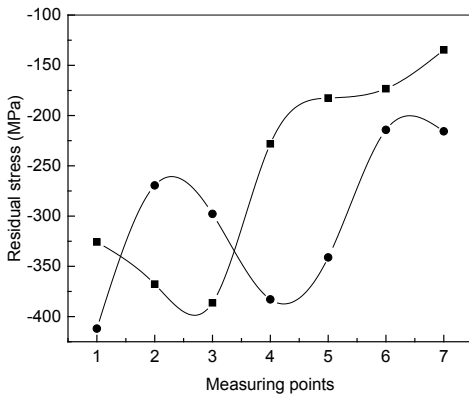


Fig. 8 Residual stress for failed wheel

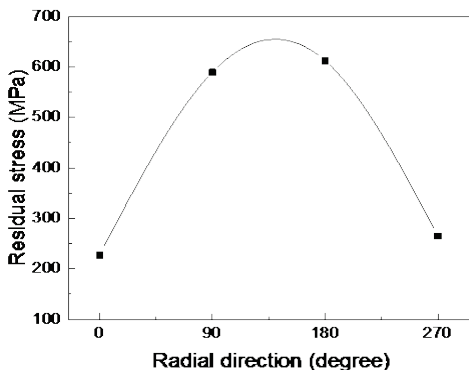


Fig. 9 Residual stress for over-braked wheel

음을 명확하게 보여주고 있다. 이것은 앞 절에서 서술한 바와 같이 차륜에서 제작초기에 존재하고 있던 압축 잔류응력이 인장 잔류응력으로 반전되면서 차륜에 균열 발생 및 손상이 발생하는 현상을 실험적으로 증명해주고 있다.

지금까지의 과제동에 의한 차륜과 정상적인 운행 차륜에서의 잔류응력 측정치의 실험결과로 유추해 보면 과제동에 의한 차륜 잔류응력 변화에 의하여 차륜이 손상될 수 있음을 알 수 있으며 이러한 잔류응력의 변화는 차륜의 성능과 안전성 평가에 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

향후 화차 차륜의 안전성 평가시 차륜 립부의 잔류응력을 측정하여 관리할 필요성이 요구되며 담면 제동식 차륜의 열한계 조건과 파손 모드에 대한 실증적인 연구가 필요하다.

## 5. 결론

담면제동식 화차용 차륜을 대상으로 차륜표면의 잔류응력을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제작시 차륜에 존재하였던 압축잔류응력이 주행마모에 따라 현저하게 변화되지는 않지만 주행거리가 증가할수록 신제 차륜과 비교하여 압축 잔류응력이 감소되는 특성을 나타내었다. FEM 해석결과에서도 이러한 경향을 보여주고 있다.

(2) 차륜 립부가 다른 부분에 비하여 20%의 잔류응력 감소치가 나타난다. 이는 과제동시 취약부라 할 수 있으며 차륜 손상시 파손되는 위치와 일치한다. 또한 차륜의 안전성 평가나 유지보수시 차륜립부의 잔류응력 측정관리가 필요하다.

(3) 과제동 차륜을 대상으로 잔류응력을 측정된 결과 차륜의 열균열 발생과 파손에 영향을 미치는 인장잔류응력이 측정되었으며 과제동시 압축잔류응력이 인장 잔류응력으로 반전될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요연구사업 과제로 지원되어 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Ekberg, A. and Kabo, E., "Fatigue of Railway Wheels

- and Rails under Rolling Contact and Thermal Loading,” *Wear*, Vol. 258, No. 7, pp. 1288-1300, 2005.
2. Lonsdale, C., Bogacz, R., and Norton, M., “Application of Pressure Poured Cast Wheel Technology for European Freight Service,” *Proc. of the 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research*, 2011.
  3. Lynch, M., Mutton, P., Epp, K., and Donnelly, R., “Improving Wheelset Performance under High Axle Loads,” *Proc. of 13<sup>th</sup> International Wheelset Congress*, Rome, pp. 1-12, 2001.
  4. Magel, E. and Kalousek, J., “Identifying and Interpreting Railway Wheel Defects,” *Proc. of the International Conference on Freight Car Trucks / Bogies*, pp. 9-12, 1996.
  5. Lonsdale, C., Dedmon, S., and Pilch, J., “Effects of Increased Gross Rail Load on 36-Inch Diameter Freight Car Wheel,” *Railway Wheel Manufacture’s Engineering Committee*, pp. 12-18, 2001.
  6. Gordon, J. and Perlman, A. B., “Estimation of Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels Following Manufacture,” *US Department of Transportation*, No. DOT/FRA/ORD-03/24, 2003.
  7. Rossmannith, H., Loibnegger, F., and Huber, R., “Thermomechanical Fatigue Fracture due to Repeated Braking of Railway Wheel,” *Materials Science*, Vol. 42, No. 4, pp. 466-475, 2006.
  8. 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.
  9. Handa, K. and Morimoto, F., “Influence of Wheel/Rail Tangential Traction Force on Thermal Cracking of Railway Wheels,” *Wear*, Vol. 289, pp. 112-118, 2011.
  10. Aviation and Railway Accident Investigation Board, “Report for Derailment of Freight Car in Topri-Bibong,” <http://araib.molit.go.kr> (Accessed 12 April 2016)
  11. Okagata, Y., “Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects,” *Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report*, No. 105, pp. 26-33, 2013.
  12. Kwon, S. J., Lee, D. H., Seo, J. W., and Kwon, S. T., “Evaluation of Residual Stress of Railway Wheel Regarding to Deterioration,” *Proc. of Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 2493-2498, 2010.
  13. Kwon, S.-J., Seo, J.-W., Jun, H.-K., and Lee, D.-H., “Damage Evaluation Regarding to Contact Zones of High-Speed Train Wheel Subjected to Thermal Fatigue,” *Engineering Failure Analysis*, Vol. 55, pp. 327-342, 2015.
  14. Kristan, J. and Garcia, G., “EMAT Evaluates Railroad Wheels,” *Advanced Materials and Processes*, Vol. 154, No. 5, pp. 25-27, 1998.
  15. Lonsdale, C., Demilly, F., and Fabbro, V., “Wheel Rim Residual Stress Measurements,” *Proc. of the Railway Wheel Manufacturers on Engineering Committee Technical Conference*, pp. 13-19, 2000.