

화차용 차륜담면의 잔류응력 분포

Residual Stress of Wheel Tread for Freight Car

권석진* 서정원* 이동형* 소진섭** 박승규** 최형수**
Kwon, Seok-Jin Seo, Jung-Won Lee, Dong-Hyung So, Jin-ub Park Sung-Kyu Choi Hyung-Su

ABSTRACT

Recently, several wheel for freight car in running had experienced the wheel failure due to fatigue crack, overheat braking and other factors. Severe heating of the wheel during tread braking was believed to be a contributing factor of derailment. It is necessary to evaluate the residual stress in wheel tread.

In the present paper, the residual stress of wheel using x-ray diffraction system is investigated. the result shows that the residual stress of wheel is depend on the running distance and wear rate of wheel.

1. 서 론

철도차량 담면제동식 차륜에서의 균열발생과 진전은 반경방향 또는 보스부, 차륜관부의 중앙부, 차륜 림부에서 시작되는 경우가 많으며 보다 심한 하중 조건하에서 손상이 발생될 수 있다. 이러한 차륜 손상의 결과로써 철도차량의 탈선 또는 인명손상, 경제적 피해 등을 발생시킬 수 있다. AAR에서는 이러한 탈선사고에 의한 경제적 비용은 평균적으로 30,000불에 달하며, 심지어 백만불에 달하는 경우도 있다고 보고한 바 있다. 1990년대 초기 북미에서 영업운행 중인 차륜의 파손으로 인한 탈선사고가 빈번히 발생되었으며, 이는 담면제동에 의해 차륜이 심각한 열손상을 받게 되어 발생한 것으로 보고되었다.

최근 국내에서도 운행 중인 화물열차에서의 차륜파손으로 인한 탈선사고가 발생한 경우가 있었다. 이와 같은 차륜파손에 의한 탈선사고는 경제적, 사회적으로 영향을 많이 미치게 되기 때문에 차륜에 대한 품질규격의 강화와 안전성 평가가 진행되어야 할 것이다.

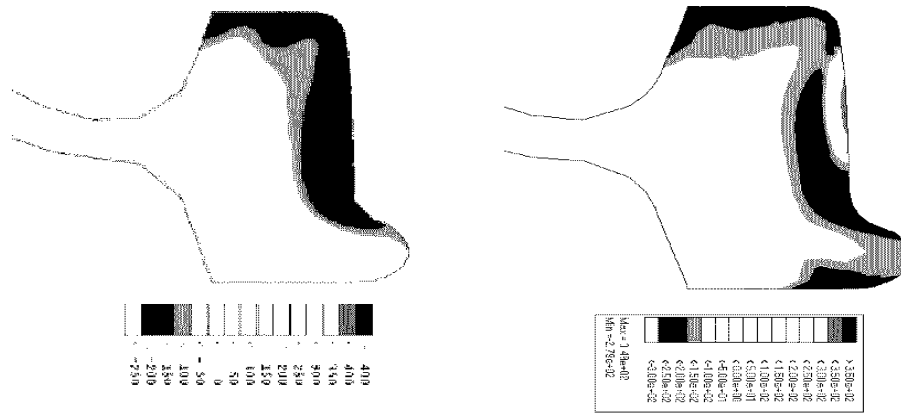
본 논문에서는 차륜의 손상원인에 대한 여러 영향인자 중에서 잔류응력에 대한 분석과 평가를 실시하였으며 주행거리에 따른 화차용 차륜의 잔류응력을 X선 잔류응력측정 시스템을 이용하여 평가하였다.

2. 차륜파손과 잔류응력과의 관계

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 고장 나거나 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.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 차륜제도연구실
E-mail : sjkwon@krii.re.kr
TEL : (031)460-5249 FAX : (031)460-5814
** 정희원, 코레일

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. 그래서 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.



a) 제조시 잔류응력 b) 과제동에 의한 잔류응력 변화

그림 1 제동에 따른 잔류응력의 변화

그림 1은 차륜의 잔류응력상태를 FBM 해석결과에 의해 추정한 결과이다. 그림 1 (a)는 차륜제조과정 중의 잔류응력 분포를 나타낸 것이고 그림 1(b)는 담면제동 중의 열적하중을 가하여 해석을 한 결과이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 신재 차륜에서는 차륜표면에서 압축잔류응력이 분포하며 운행 중의 외부 하중에 의하여 인장상태로 바뀌어지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 피로균열(또는 열균열)을 발생시킬 수 있으며 이러한 균열이 성장하면 극단적으로 차륜 파손에 도달할 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.

3. 시험방법

3.1 시험편

차륜의 잔류응력 측정을 위하여 국내에서 운용 중에 있는 그림 2와 같은 화차용 차륜을 대상으로 시험을 실시하였다. 시험차륜은 마모한도 차륜과 제동다이내모 시험용으로 과제동시험을 실시한 차륜을 대상으로 잔류응력측정 시험을 수행하였다.

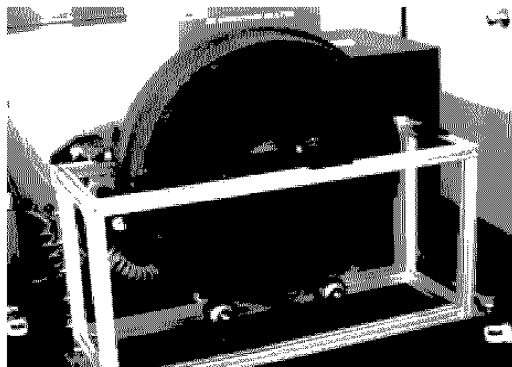


그림 2 시험용 차륜

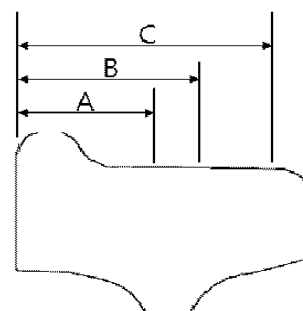


그림 3 차륜에서의 잔류응력 측정위치

그림 3은 차륜 담면에서의 잔류응력 측정 위치이다. 차륜 플랜지를 기점으로 A 위치(75mm), B 위치

(110mm), C 위치(135mm)에서 X선을 조사하여 잔류응력을 측정하였으며 차륜의 원주방향으로 90°간격으로 잔류응력을 측정하였다.

3.2 잔류응력 측정 장치와 측정 방법

잔류응력을 측정하는 방법에는 천공법, 절단에 의한 스트레인게이지 측정법, 초음파를 이용한 측정법 등이 있으나 본 연구에서는 그림 4와 같은 X선을 이용한 측정장치를 이용하여 실험을 실시하였다. 차륜에서의 잔류응력의 측정은 원주방향으로 회전하면서 측정하였으며 X선 조사 각도는 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 로 25° 간격으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 차륜의 잔류응력에 대한 측정결과는 각각 3번씩 측정하여 평균값을 비교하였다. 도표 1은 차륜 잔류응력 측정시의 측정조건을 나타낸 것이다.

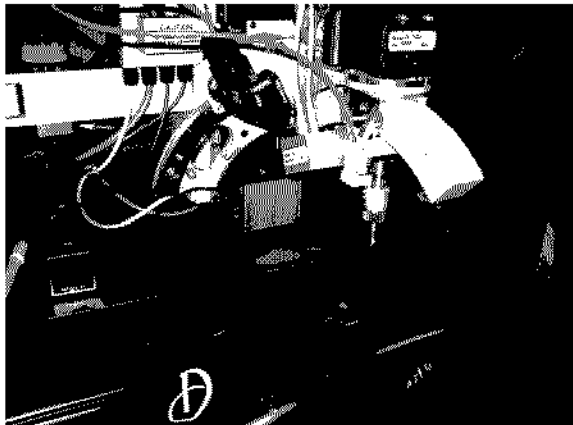


그림 4 잔류응력 측정

도표 1 측정조건

항목	조건
특성 X선	Carbon steel
필터	Cr
빔직경(mm)	3
관전압(kV)	25
관전류(mA)	0.8
측정시간(sec)	60

4. 차륜 잔류응력 측정결과

4.1 누적 주행거리에 따른 잔류응력의 변화

그림 5는 마모한도 차륜에서의 원주방향으로의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 원주방향에서의 잔류응력 분포도를 측정하기 위하여 45° 간격으로 측정한 결과 일정한 분포도를 나타내지 않았다. 그림 5에서와 같이 원주방향의 각도에 따라 $-270 \sim -470$ MPa의 압축응력 분포도를 나타내었으며 압축 잔류응력이 감소되거나 증가되는 영역이 원주방향에서 존재하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 경향은 신재 차륜이 일정한 압축잔류응력을 나타내는 것과 달리 운행 중의 체륜자와 레일과의 마찰전동에 의해 차륜 표면에서의 불균일한 잔류응력분포도에 기인한 것이라 추정할 수 있다.

그림 6~그림 8은 차륜의 림두께(또는 주행거리)에 따른 잔류응력의 분포도를 측정한 결과이다. 차륜의 잔류응력은 주행거리에 따라 현저하게 변화되는 특성이 관찰되지 않지만 주행거리에 따라 차륜의 압축 잔류응력이 점차적으로 감소되고 있는 것을 알 수 있다.

또한 차륜 플랜지쪽 보다는 차륜 림부쪽에서 압축 잔류응력이 감소되고 있음을 알 수 있으며 차륜 림부쪽이 파손에 대하여 더 취약함을 알 수 있다.

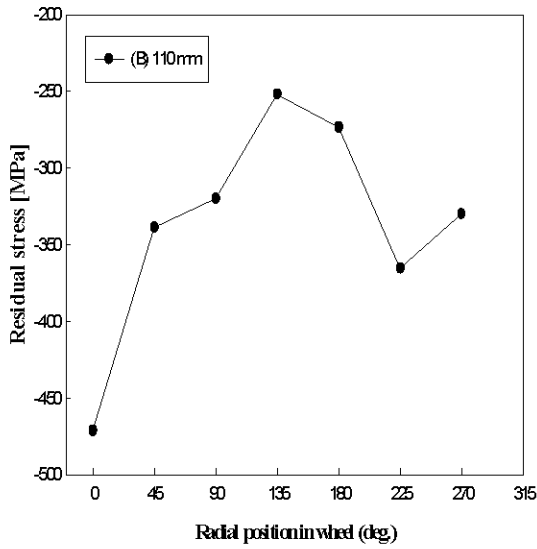


그림 5 원주방향에서의 잔류응력

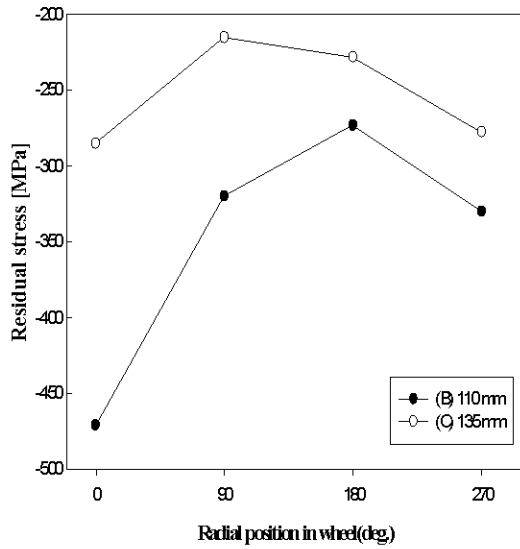


그림 6 림두께 26mm 의 잔류응력

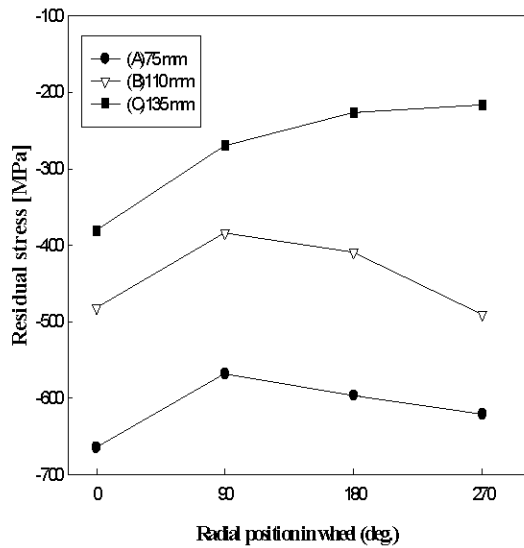


그림 7 림두께 28mm의 잔류응력

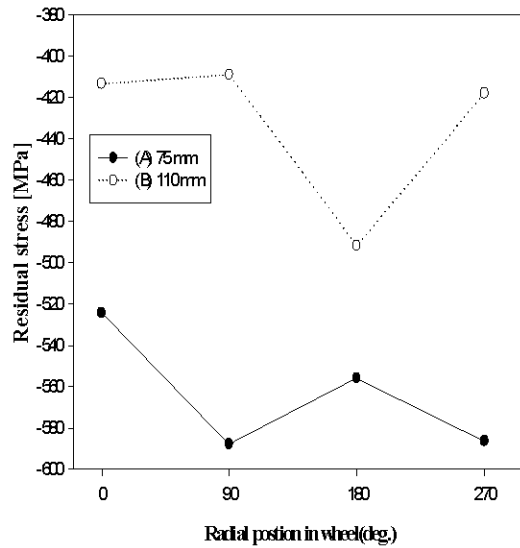


그림 8 림두께 38mm의 잔류응력

4.2 과제동에 따른 잔류응력의 변화

그림 9는 제동 다이내모 시험기에서 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 있음을 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.

그림 10은 과제동에 의한 차륜과 정상적인 운행 차륜에서의 잔류응력 측정치 비교를 나타낸 것이다. 그림 10과 같은 실험결과로 유추해 보면 과제동에 의한 차륜 잔류응력 변화에 의하여 차륜이 손상될 수 있음을 알 수 있으며 이러한 잔류응력의 변화는 차륜의 품질성능과 안전성 평가에 중요한 인자임을 확인할 수 있다.

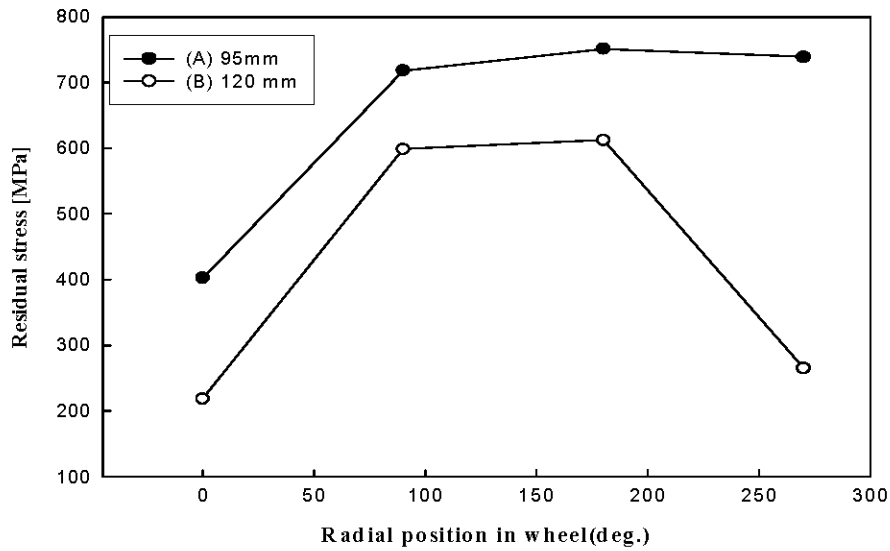


그림 9 과제동 차륜의 잔류응력

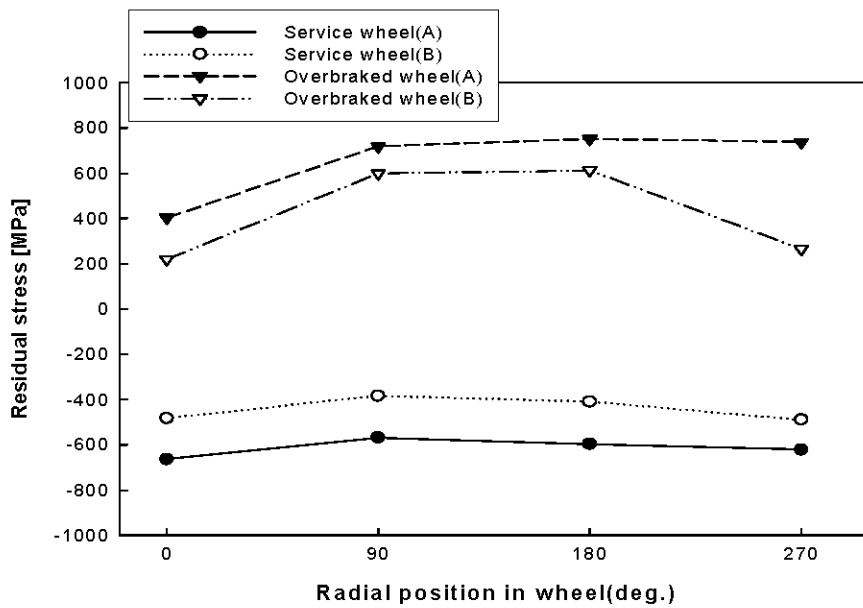


그림 10 마모한도 차륜과 과제동 차륜의 잔류응력 비교

5. 결론

국내에서 운용 중인 화차용 차륜을 대상으로 차륜표면의 잔류응력을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 초기에 차륜에 존재하였던 압축잔류응력이 주행거리에 따라 현저하게 변화되지는 않지만 초기 주행차륜보다 압축잔류응력이 감소되는 특성을 나타내었다.

2) 과제동 차륜을 대상으로 잔류응력을 측정된 결과 차륜의 열균열 발생과 파손에 영향을 미치는 인장 잔류응력이 200~600 MPa이 분포하고 있었다. 만일 차륜과 제륜자사이에 과제동이 발생한다는 가정 하에 압축 잔류응력이 인장 잔류응력으로 반전되면 차륜에 손상을 발생시킬 수 있는 영향인자로서 추정된다.

3) 답변 제동을 갖는 차륜의 경우에는 차륜의 손상을 방지하기 위하여 제조시 차륜의 잔류응력을 규격화하는 것은 바람직하다고 사려 되며, 국내외 차륜규격과 측정결과를 분석한 결과 차륜의 잔류응력에 대한 기준치는 더 많은 시험과 연구를 통하여 국내 실정에 맞는 기준치를 설정할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Del Fabbro, V., and Catot, B., 1995, "Ultrasonic Measurement of Stresses in New Wheels," Proceedings, 11th International Wheelset Congress, Paris, pp. 251-259.
- [2] Gordon, J., and Perlman, A. B., 1998, "Estimation of Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels Following Manufacture," Proceedings, International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, ASME RTD Vol. 15, pp.13 - 18.
- [3] Gordon, J., Jones, J. A., and Perlman, A. B., 1998, "Evaluation of Service-Induced Residual Stresses in Railroad Car Commuter Wheels," Proceedings, International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, ASME RTD Vol. 15, pp. 25 - 32.
- [4] Kristan, J., and Garcia, G., 1998, "EMAT Evaluates Railroad Wheels," Advanced Materials and Processes, November 1998, pp. 25-27.
- [5] Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels, Federal Railroad Administration, RR99-01, APRIL 1999
- [6] Anders Ekberg, Elena Kabo, 2005, Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading, wear, vol.258, pp.1288-1300