

계장화 압입시험을 이용한 차륜의 강도평가

The Strength Evaluation of Wheel for Railway Rolling Stock Using Instrumented Indentation Test

김철수*, 안승호**, 정광우**, 박신호***, 강길현***

Chul-Su Kim, Seung-Ho Ahn, Kwang-Woo Chung, Shin-Ho Park, Gil-Hyun Kang

ABSTRACT

To assure safe usage of railway rolling stock, it is important to evaluate the strength of the wheel which is core part in bogies. However, conventional standard testing methods using destructive technique could not evaluate mechanical properties of degraded wheels during rolling stock maintenance work. Instrumented indentation test is a new way to evaluate nondestructively the strength of mechanical components by analyzing indentation load-depth curves. In this study, to evaluate tensile strength of the wheel, instrumented indentation test is performed nondestructively according to KS B 0950. Furthermore, test results are examined by tensile test in accordance with KS R 9221.

1. 서론

철도 차량용 차륜(이하 차륜)은 최근 열차 운행 횟수, 수송량, 주행속도 그리고 축하중(axle load)의 증가로 인하여 설계시 예상된 운행조건보다 가혹한 환경에 놓여있다. 이러한 환경하에서 차륜은 여러 메커니즘에 의해 손상을 받는 것으로 보고되고 있다[1]. 실제 차륜에서 발생하는 대표적인 손상형태는 답면·플랜지 마모, 찰상 및 박리, 답면부 셸링, 열균열, 판부피로 등이 있다[1,2]. 이의 주된 원인은 운행동안 레일과 접촉에 의한 윤중 및 횡압과 제동에 의한 열응력(thermal stress), 축의 압입응력, 잔류 응력, 표면 마무리 처리의 미흡 등이다. 이러한 원인에 의한 손상에 따른 안전사고의 빈도는 낮지만 중대한 사고로 연결될 수 있다. 따라서 철도수송의 절대적인 안전성 확보를 위한 기초연구 일환으로서, 차륜의 강도평가는 매우 중요하다.

신차륜 도입시 이의 강도는 KS규격(KS R 9221)에 준하여 차륜에서 표준시험편으로부터 채취하여 인장시험 또는 간편한 경도시험으로 평가하고 있다. 그리고 차륜은 현재 검수규정에 따라 주기적으로 유지보수하고 차륜답면을 삭정함으로서 관리하지만, 도입에서 폐기까지 주행키로에 따른 차륜 강도의 열화(degradation)정도를 평가하는 것은 매우 어렵다. 이의 원인은 차륜의 강도를 평가하기 위하여 일정크기와 형태를 갖춘 시험편을 직접 채취해야 되기 때문이다. 따라서 차륜 유지보수 측면에서 열화에 따른 차륜의 강도를 비파괴 시험을 통하여 평가하는 것이 매우 중요하다.

인장시험의 한계 및 대안의 부재를 극복하기 위하여, 비파괴시험에 의한 기계부품의 강도를 평가하는 연구는 많이 수행되고 있으며, 이 중에서 가장 구체적으로 현실화된 것이 계장화 압입시험법(instrumented indentation test)이다[3-5]. 이 시험법은 부품으로부터 시편채취를 하지 않고 압입 하중을 다중인가 및 제거하고 압입 하중에 따른 압입 깊이의 변화를 계장화 장치를 이용하여 연속적으로 측정

* 한국철도대학 철도차량기계과

** 한국철도대학 철도운전기전과

*** 한국철도공사 철도연구개발센터

**** 한국철도공사 기획조정본부

함으로써 항복강도 및 인장강도와 같은 기계적 특성을 평가하는 방법이다[3]. 이 시험법은 최대 수백 마이크로미터 이내의 작은 압흔만을 남기 때문에 차륜 검수시 이를 활용한다면, 답변 삭정후에 검사차륜은 계속 사용할 수 있으며, 답변부의 다양한 위치에서 강도 변화를 함께 평가할 수 있다.

본 연구에서는 철도차량용 차륜에 대하여 인장시험으로부터 강도를 평가하고, 비파괴 시험기법인 계장화 압입시험을 통하여 이들 결과를 비교 및 검토하고자 한다.

2. 이론 해석 및 시험방법

2.1 계장화압입시험법을 이용한 강도평가

계장화압입시험법을 이용한 강도평가를 위해서는 압입 인장시험 결과에서 진응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다. 우선 진응력 σ 은 완전 소성영역에서 식(1)과 같이 평균 접촉압력 P_m 과 소성구속인자 ψ 를 결정함으로써 평가한다[3-5].

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (1)$$

그리고 압입변형률 ϵ 은 실제적인 압입 변위를 미분하여 평가한 변형률 개념에서 식 (2)와 같이 적합화 상수 α 를 포함하는 압입변형률을 정의할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a_c/R)^2}} \frac{a_c}{R} \quad (2)$$

여기서 R 은 압입자 반지름이고 a_c 는 압입자와 재료간의 실제 접촉반지름이다.

압입자 주변에 소성 변형이 진행됨에 따라 변형된 재료 주위에는 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나, 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in 현상이 발생하는데, 압입자/시편의 접촉반경은 가공경화지수 n 과 직접적인 관계를 갖는 압흔 주변의 이러한 현상들에 의해서 크게 영향을 받으며 이를 고려한 접촉반경은 식(3)과 같이 유도될 수 있다.

$$a_c^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_s^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (3)$$

여기서 $h_c^* = h_{\max} - w \frac{L}{S}$ 이며, L 은 압입하중, w 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수, S 는 탄성회복에 해당되는 압입하중 제거곡선의 초기 접선의 기울기이다. 그리고 식(1)과 (2)식을 Hollomon 식에 따라 적합화하면서, 식(3)과 비교하여 가공경화지수와 접촉반경을 결정하면 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 결정할 수 있다[3-5].

2.2 재료 및 인장시험

본 연구에 사용된 차륜은 최고속도 150km/h이하에 사용되는 철도차량의 탄소강압연차륜(일체차륜)을 말하며, 이의 종류는 RSW1형으로서 객화차에 사용되는 것이다. 표 1은 KS R 9221에 준하여 평가한 차륜의 화학 분석 결과이며, 규격치에 적합하였다.

인장시험은 KS B 0802에 준하여 변위제어하에 5mm/min속도로 수행되었다. 그리고 인장시험편은 Fig.1에서와 같고, 채취위치는 KS규격 R 9221에 준하여 림(rim)부위이며, 이의 모습은 Fig. 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions (units: wt-%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu
KS	0.67 이하	0.15 이상	0.6 ~ 0.9	0.045 이하	0.045 이하	0.35이하
Test result	0.66	0.26	0.74	0.018	0.011	0.01

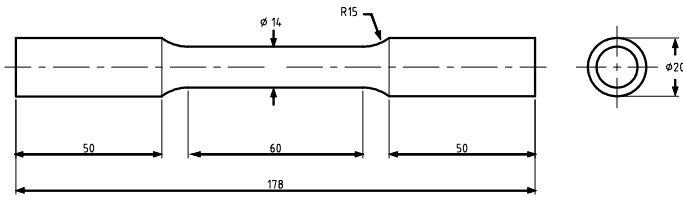


Fig. 1 Tensile test specimen

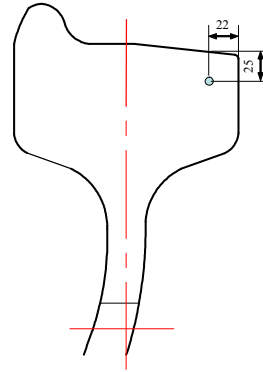


Fig. 2 Position of tensile test specimen extracted from the wheel

2.3 비파괴기법을 이용한 강도평가

본 연구에서 비파괴 강도평가는 계장화 압입시험기(Model: AIS2100, FRONTICS Co.)를 사용하였다 [3-5]. 계장화 압입시험은 일반적인 인장 시험과는 달리 국부적인 부위에서 이루어지므로, 1회의 시험으로 그 부위의 강도를 평가하기에는 편차가 발생하게 된다. 이러한 기계적 강도 편차를 고려하여 5회 수행 후에 평균값을 해당 부위의 압입 인장물성값으로 사용한다.

Fig. 3은 계장화 압입시험을 위한 차륜의 시험위치를 나타낸 것이다. 그림의 1에서 3지점까지 시험은 KS 규격상의 인장 및 충격시험편을 채취하는 부위의 표면에서 수행하였다. 그리고 4 및 5지점의 시험은 기존 연구[6-8]의 응력해석결과로부터 판부(plate)에서 가장 취약한 위치에서 각각 3회 반복하여 수행하였다. 본 시험에 사용된 압입자는 0.5mm 구형(spherical Indenter)이고, 최대압입깊이는 150 μ m이다. 또한 하중인가속도는 0.3mm/min이며, 하중인가 - 제거 반복회수는 15회이다.

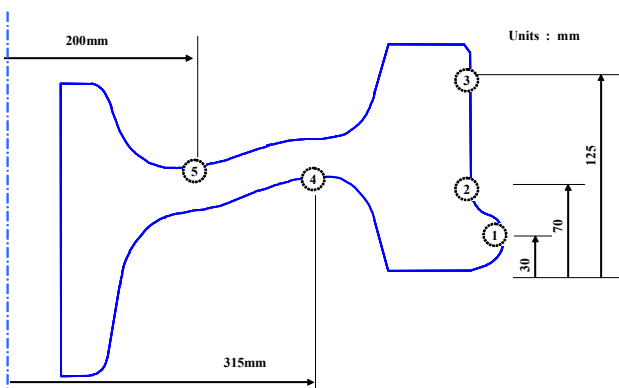


Fig. 3 Positions of instrumented indentation test

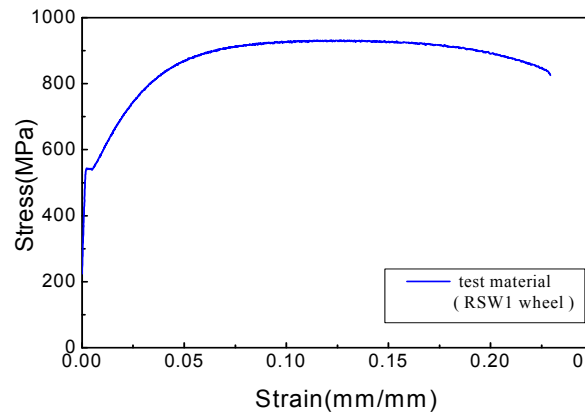


Fig.4 Engineering stress vs.strain curve obtained from tensile test

3. 해석결과 및 고찰

3.1 인장시험을 통한 기계적 특성 평가

Fig 4는 KS규격에 준한 인장시험으로부터 얻어진 차륜의 응력-변형률 선도의 일례를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 기계적 성질을 정리하면 Table 2와 같다. 이 표에서 인장강도는 922MPa로서 시편 3개로부터 얻은 평균값들이며, KS규격치에 적합하였다.

3.2 계장화 압입시험을 이용한 강도평가

Fig. 5는 차륜에 계장화 압입시험을 통하여 얻은 압입깊이에 대한 하중선도의 일례이다. 이로부터 식 (1) ~ (3)을 이용하여 응력-변형률 선도를 구하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 점선은 인장시험으로 얻은 결과이고, 실선은 계장화 압입시험으로부터 평가한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 항복강도는 약간 차이가 나지만 인장강도는 일치하므로 본 시험의 강도평가에 대한 유효성을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig.3의 차륜 표면위치에 따른 강도변화를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 4번 및 5번지점의 판부에 대한 인장강도는 약 14%정도 담면부의 인장강도보다 낮음을 알 수 있다. 이는 판부에 대한 기계적 특성 평가의 필요성을 시사한다. 그리고 1번, 4번, 5번지점의 인장강도 값들은 KS 규격치 (835~960 MPa)를 만족하지만, 2번지점 및 3번지점의 강도는 KS 규격치보다 크다. 이의 원인을 살펴보면, KS 규격의 시편채취 위치는 담면 표면의 25mm 밑에서 채취하였지만, 이 시험은 표면에서 평가하였으므로 채취위치의 차이로 다소 달라질 수 있다. 이는 깊이에 따른 재료의 인장강도의 변화를 보면 확인할 수 있다. Fig. 8은 KS규격의 인장시험편 채취와 유사한 3번지점의 깊이에 따른 압입인장강도 분포를 나타낸 것이다. 압입인장강도는 표면에서 깊이 15mm까지 감소한 후에 약 870MPa로 수렴한다.

Table 2 Mechanical properties

	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Hardness (HB)	Charpy impact energy (J)
규격	835~960	14 ≤	28최소 23최소	248 ~ 285	20 ≤
Test results	922	22	49	257	23

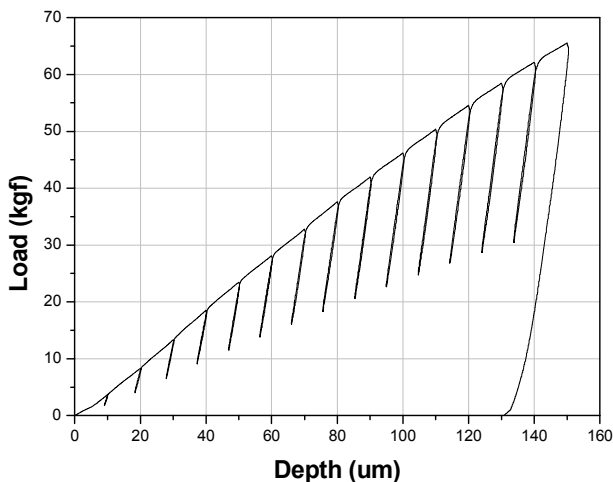


Fig. 5 Indentation load-indentation depth curve

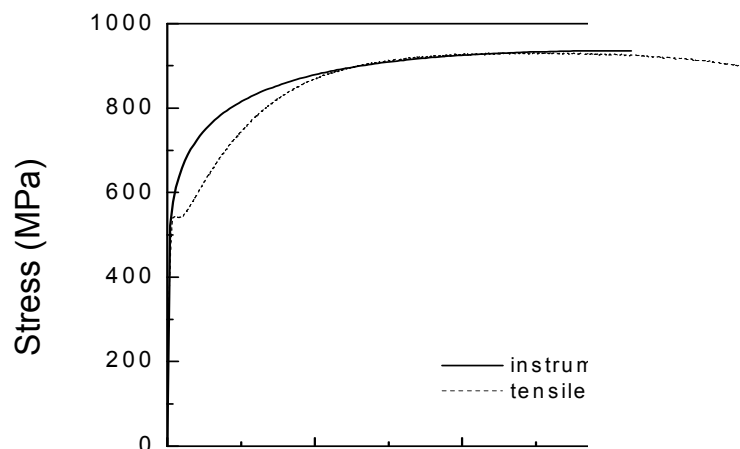


Fig.6 Comparisons of test results between tensile and instrumented indentation

이상의 결과로부터 최초 도입할 당시 신차륜에 대한 계장화 압입 시험을 통한 강도평가를 충분히 수행하여 데이터 베이스를 구축함으로써, 차륜 검사시 사용 전후를 상대적 검토할 경우에 시험편을 채취하지 않고 비파괴적으로 열화에 의한 강도평가에 유용하게 활용할 수 있다고 사료된다.

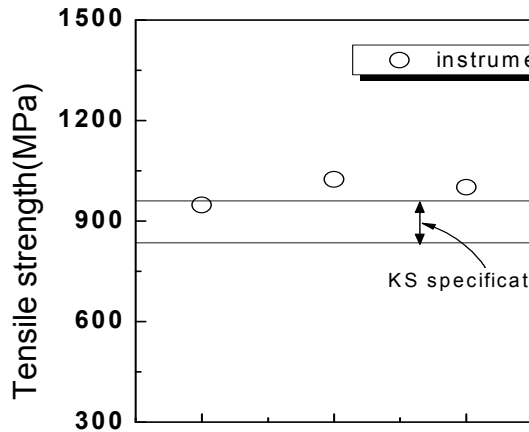


Fig.7 Tensile strength distribution obtained from instrumented indentation test

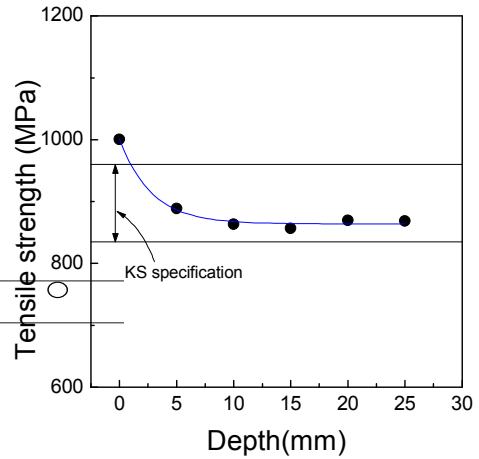


Fig. 8 Tensile strength distribution with the depth obtained from instrumented indentation test

4.결론

본 연구에서는 철도차량용 차륜에 대하여 인장시험으로부터 강도를 평가하고, 비파괴 시험기법인 계장화압입시험을 통하여 이들 결과를 검토하였다.

차륜의 판부에 대한 인장강도는 약 14%정도 답면부의 인장강도보다 낮게 평가되므로 향후 차륜검사시 추가적으로 판부에 대한 기계적 특성 평가의 필요성을 시사한다. 표준 인장시험과 계장화 압입시험을 통한 인장강도를 비교하면, 차륜 위치에 따라 다소 차이가 발생하였다. 이의 원인을 살펴보면, KS 규격의 인장시험편채취 위치는 답면 표면의 25mm 밑에서 채취하였지만, 계장화 압입 시험은 표면에서 평가하였으므로 채취위치의 차이로 다소 달라질 수 있다. 이를 확인하기 위하여 표면에서 깊이 방향으로 압입인장강도를 평가하면, 인장강도는 표면에서 깊이 15mm까지 감소한 후에 약 870MPa로 수렴한다.

이로부터 최초 도입할 당시 신차륜에 대한 “KS B 0950의 계장화 압입 인장 물성평가“를 충분히 수행하여 데이터 베이스를 구축함으로써, 이로부터차륜 검사시 사용 전후를 상대적 검토할 경우에 시험편을 비파괴적으로 채취하지 않고 강도평가에 유용하게 활용할 수 있다고 사료된다.

참고문헌

- [1] Shigeru Suzuki, Atsushi Hamazaki, Yasutaka Toya, Kazuo Nakase, Kenji Hirakawa, Haruo Sakamoto, Kazuo Toyama, “最近の鐵道用車輪について”, 住友金屬, Vol. 33 No. 3, pp. 8~24, 1981.
- [2] Kunio Nishioka, Kenji Hirakawa and Hideo Komatsu, 1972, "鐵道車輛用車輪板部の疲勞強度", 住友金屬, Vol. 24. No. 4, pp. 27~42.
- [3] 김광호,최열,김성훈,이정석, 권동일, 2005, “사용 중 부품.소재의 비파괴적/기계적 물성 평가를 위한 계장화 압입시험법 활용”, 대한기계학회 춘계학술대회,Vol.5, No.1, pp.32.

- [4] 구병춘, 이동현, 권동일, 최열, 2004, "계장화 압입시험에 의한 용접부의 물성 측정 및 피로수명 예측", 한국철도학회논문집, Vol.7, No.2, pp.141-148.
- [5] 장재일, 최열, 손동일, 권동일, 2001, "Advanced Indentation System을 이용한 현장에서의 비파괴 인장물성 평가", 한국비파괴검사학회 춘계학술대회, Vol.1, No.1, pp.286-291.
- [6] 김정규, 2003, "철도차량용 차륜의 응력해석 및 피로강도", 한양대학교 산업과학연구소논문집
- [7] 성기득, 양원호, 조명래, 정기현, 2001, "철도차량용 휠 플레이트의 응력해석 및 형상설계에 관한 연구(2)", 한국자동차공학회논문집, Vol.9, No.3, pp.221-229
- [8] L. Ramanan, R. Krishna Kumar and R. Sriraman, 1999, "Thermo-mechanical finite element analysis of a rail wheel", International Journal of Mechanical Science, pp. 487~505.