

파손시나리오에 의한 차륜-레일의 파괴역학적 안전성 평가

Safety Evaluation of Wheel-Rail System Based on Fracture Scenarios and Fracture Mechanics

권석진* 이동형** 서정원*** 구병춘****
Seok-Jin Kwon, Dong-Hyung Lee, Jung-Won Seo, Byeung-Chun Goo

ABSTRACT

Fracture mechanics approach can be severely hampered unless considerable detailed specific knowledge is available. The problem of railway wheel-rail system fatigue design is currently undertaken by using assumed conservative design procedures. However, although the failure rate is low, the consequences of any such failure can be far reaching. It has been demonstrated that the tools available for effective management have limits. In the present study, the safety evaluation based on fracture mechanics is carried out. The critical crack size and remaining lifetime are calculated on the wheel for high-speed train.

1. 서론

철도차량의 고속화, 고밀도로 인하여 차량의 운용조건이 점점 더 가혹해지고 있으며 차륜과 레일은 각종 환경조건하와 복잡한 하중 하에서 운용되고 있기 때문에 충격하중과 경년열화에 따른 내구성 저하로 인해 피로손상이 발생하게 된다. 차륜-레일 시스템에서의 손상은 구름접촉피로(rolling contact fatigue, RCF)에 의해 차륜/레일의 경계영역에서 발생하며 이는 주요한 환경적 문제로 부각되고 있다. 또한, 제동시 제륜자와의 마찰열의 냉각과 과열에 의하여 차륜담면 표면에 손상이 나타나기도 한다. 그림 1은 이러한 차륜 담면에 발생하는 손상사례를 보여준다.

고속주행 중의 차륜/레일 시스템의 고장으로 인한 탈선사고는 막대한 인명과 재산의 피해를 가져오기 때문에 이의 정량적 안전성 평가에 대한 연구가 필요하다. 차륜과 레일의 제동시 열응력 또는 구름접촉 피로에 의하여 발생한 균열이 진전하고 있을 경우 그 결함은 정기적인 검사에 의하여 안전성을 보증받기도 하지만 정기적인 비파괴 검사에서 완전하게 모든 결함을 검출할 수 없다. 따라서 차륜-레일 시스템

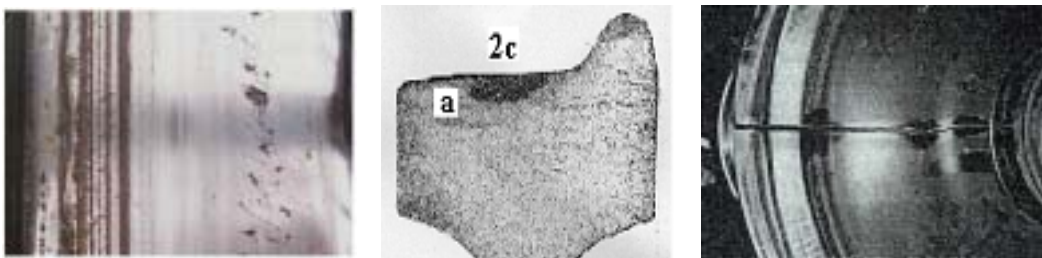


그림 1 차륜의 손상사례

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부
E-mail : sjkwon@krri.re.kr
TEL : (031)460-5249 FAX : (031)460-5279
** *** **** 한국철도기술연구원

에서 발생한 결함에 대하여 어느 정도의 파손한계를 가지는 지와 균열진전시 어느 정도의 잔여수명을 가지는 지에 대한 파괴역학적인 정량적 평가가 필요하다. R.A.Smith[1]는 철도차량 차축에 대하여 파괴역학을 이용한 잔여수명 평가를 실시하였으며 S.Cantini[2] 등은 파괴역학적 특성실험을 고려하여 윤축피로 설계자료로 활용하였다. 또한 F.Bumbieler [3]등은 균열에 따른 차륜재의 검사기간에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 차륜에 발생한 균열에 대하여 임계균열치수와 그 균열이 진전하여 파손에 이르기 전까지의 안전성 평가에 대하여 연구를 실시하였다.

2. 파손시나리오에 의한 계산조건

2.1 평가모델과 가정조건

파손시나리오에 의한 안전성 평가를 위하여 타당한 평가모델을 가정하는 것이 필요하다. 고속도용 및 기존선용의 차륜의 손상사례에 의하면 차륜립부 담면을 기점으로 차륜 중심방향으로 균열이 전파되고 있는 예가 발생되고 있다. 여기에서는 담면 중앙에 반타원형상의 표면균열이 발생, 전파하는 시나리오를 가정하였다. 단 차륜의 형상이 단순하지 않을 뿐만 아니라 실동하중 조건하에서의 차륜의 응력분포를 충실하게 재현하여 수치계산을 실시하는 것은 현시점에서 곤란하기 때문에 그림 2와 같은 모델을 차륜으로 가정하여 계산을 실시하였다.

판 폭 중앙부에 aspect 비는 0.4로서 반 타원표면균열이 존재하는 모델을 채택하였다. 차륜모델의 폭 및 두께는 고속도용 차륜치수로서 135 mm 및 60 mm로 하였다. 이 차륜모델에 인장 반복응력이 작용하는 경우에 대하여 파괴역학적 안전성의 보증기간에 미치는 각종 영향인자의 영향도를 평가하였다. 응력비는 1(최소 응력이 제로값)으로 하였으며 응력확대계수의 산출에는 Newman-Raju의 방정식을 이용하였다. 표 1에 본 연구에서 수치계산한 조건을 열거한다.

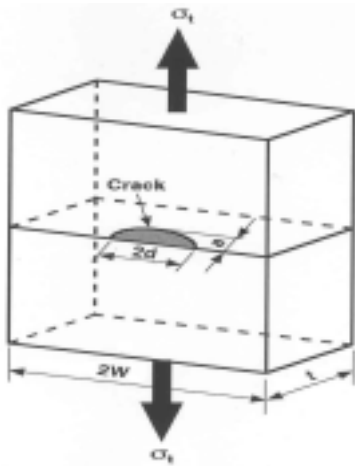


그림 2 평가 모델

표 1 계산 조건

차륜 폭 (W, mm)	차륜립두께 (t, mm)	C	m	K _{IC} (MPa m ^{0.5})	
				R.T	-20℃
135	60	1.513×10 ⁻¹¹	3.69	82	66

2.2 변화 파라메타들

(1) 재료특성

고속도용 차륜재에 대하여 실온의 파괴인성치 값을 실험에 의하여 구하였다[4]. 82 MPa m^{0.5}의 값을 기본으로 -20℃ 저온에서의 파괴인성치는 66 MPa m^{0.5} 및 100℃ 고온 충격시험결과에서 예측된 파괴인성치값은 152 MPa m^{0.5}을 각각 상한치와 하한치로 하였다.

(2) 피로균열진전특성

고속도용 차륜에서 채취한 시편으로 피로균열진전특성 데이터를 얻었으며 Paris 법칙에 따라 계수 C를 변수로 하였다. 또한 지수 m은 차륜재료에서 실측된 3.69로 고정하였다. 실동하중에 대해서는 미지의 부분이 많이 존재한다. 가속시, 제동시 또는 곡선 주행시 등의 차륜이 선로에서 받는 하중의 크기, 방향, 변형율은 복잡하게 변화된다. 또한, 제동시의 가열, 냉각과정에서의 열응력 등도 중요한 응력 작용원이

된다. 여기에서는 림부의 Ⅱ방향의 인장응력만을 가정하여 그림 2에 표시된 인장응력만이 반복작용하는 것으로 수치계산을 실시하였다.

(3) 반복응력의 크기

차륜재에 작용하는 응력 측정시 윤중과 횡압을 측정하게 된다. 이때에 작용하는 응력을 100 MPa를 가 하였으며 200 MPa 및 300 MPa로 변화시켜 가면서 임계균열의 크기와 잔여수명의 영향에 대하여 안전성 평가를 실시하였다.

(4) 돌발적인 극대하중

고속도용 차륜재의 실온에서의 항복응력은 540 MPa이지만 이것에 근접한 550 MPa의 응력이 돌발적으로 작용하는 경우, 차륜재의 잔여수명이 어느 정도 감소할 것인가를 계산하였다. 즉, 그림 1에 보여준 바와 같이 제륜자의 이상 작동으로 인하여 차륜담면이 급가열, 급냉을 동반하는 파손 시나리오를 고려해 볼 수 있다. 이의 수치계산시 이 돌발하중의 균열 진전속도에 대한 영향은 고려하지 않았다.

(5) 초기결함 치수

결함깊이 2mm × 길이 10mm를 기본으로 깊이 1mm × 길이 2mm, 깊이 5mm × 길이 10mm 및 깊이 10mm × 길이 20mm로 가정하여 결함검사에 대한 영향인자로서 초기 결함치수를 변화시켰다. 이것은 확실하게 검출할 수 있는 최소 결함치수가 변화하는 경우에 보증 운전기간에 어느 정도 영향을 미칠 것인가에 대하여 알고자 함이다.

2.2 Newman-Raju의 방정식

안전성 평가를 위하여 사용한 평가모델의 방정식은 다음과 같다[5].

$$K_I = \sigma_t F \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$Q = 1 + 1.464 A^{1.65}, \quad F = [M_1 + M_2 A_t^2 + M_3 A_t^4] f_{\phi} f_w$$

여기에서, 인장응력은 σ , a는 반타원 표면균열길이, 판두께는 t, 폭은 2W를 표시한다.

3. 차륜 파손에 미치는 안전성 평가

3.1 파괴인성치의 영향

균열진전(깊이방향)의 모양을 반복수의 함수로서 나타낸 것이 그림 3에 있다. 반복응력진폭 100 MPa, 초기균열깊이 2mm, Paris 법칙 C값 1.513×10^{-11} 으로 적용하였다. 이 균열진전속도값은 실험에 의하여 구해진 값을 이용하였다. 여기에서는 균열진전속도는 재료의존성을 고려하지 않았기 때문에 불안정파괴에 이르는 임계균열길이만이 재료의 파괴인성치에 의존하여 증감하게 된다. 특히 희박하게 큰 응력이 작용하는 것을 가정한 경우(여기에서는 550 MPa)에는 파괴인성이 낮은 재료에서는 수명이 명확하게 저하한다. 또한, 파괴인성이 작은 경우에는 불안정 파괴로 전이하는 임계균열치수가 작게 되기 때문에 정기 검사시 작은 임계균열도 검출되지 않을 뿐만 아니라 확실하게 검출하는 것이 요구된다.

3.2 피로균열진전 특성의 영향

고속도용 차륜에 대하여 실온에서 피로균열 진전속도 데이터를 기본으로 Paris법칙의 계수 C를 1.513×10^{-11} 에서 1/2~2배의 범위로서 변화시킨 경우 균열진전속도에의 영향을 나타낸 것이 그림 4이다. 파괴에 도달하는 반복수는 약 1/2~2배의 범위로 변화되어 피로균열진전특성을 정도 좋게 파악하는 것의 중요성을 나타내고 있다. 차륜간의 개체차와 부위에 따른 특성의 편차도 고려하여 피로균열진전특성을 통계적으로 평가하는 것이 필요하다. 게다가 피로균열진전특성의 경년적 변화에 대해서도 조사가 필요하다.

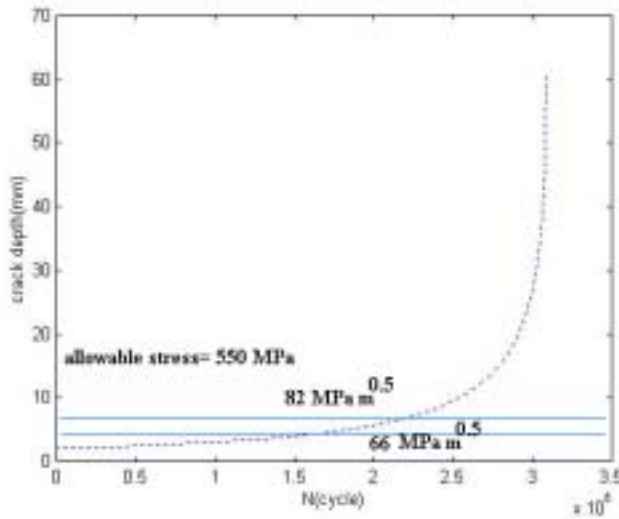


그림 3 파괴인성치의 영향

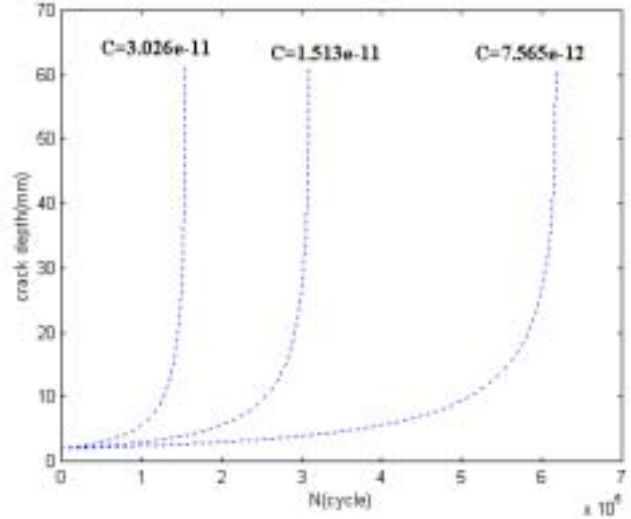


그림 4 피로균열 진전특성 영향

3.3 반복응력 크기의 영향

실동하중하의 응력조건에서는 불명확한 점이 많다. 고려하여 얻은 응력원은 선로에서 받는 하중, 제동시 열응력, 잔류응력 등 다양하다. 선로에서 받는 하중도 수직하중, 횡하중 뿐만 아니라 가속시, 제동시의 답면에는 선로와의 마찰에 따라 차륜 방향에도 큰 반복응력이 작용하게 된다. 여기에서는 단순 인장반복응력을 가정하여 반복 응력폭을 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa 로 한 경우의 균열진전속도를 그림 5와 같이 비교하였다.

반복응력 폭의 수명에의 영향은 대단히 크며 100 MPa에서 300 MPa로 상승하는 것에 따라 수명이 점점 저하한다. 이 결과는 실동하중하에서의 반복응력 성분의 정량 평가가 가장 중요한 연구항목인 것을 나타낸다. 그런데 실동하중하의 하중진폭은 단순하지 않다. 그래서 랜덤한 응력파형하에서의 균열진전속도 예측에 대하여 기존의 지식이 대단히 적다. 따라서 실동하 변동하중의 모델화와 그것에 기초한 실동하중하의 균열진전평가방법의 확립이 대단히 중요하다.

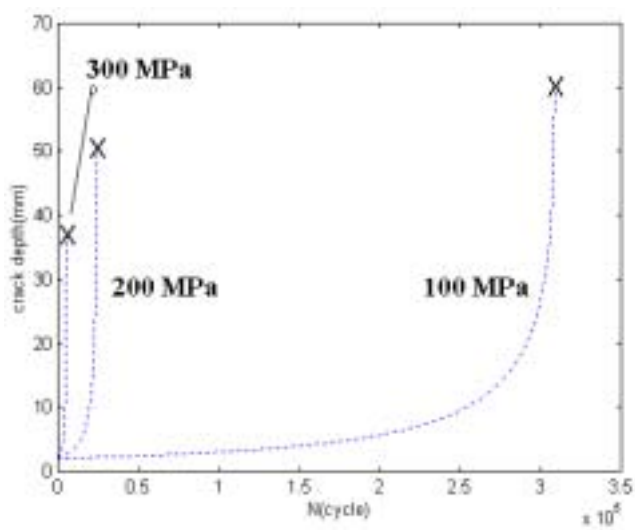


그림 5 반복응력의 영향

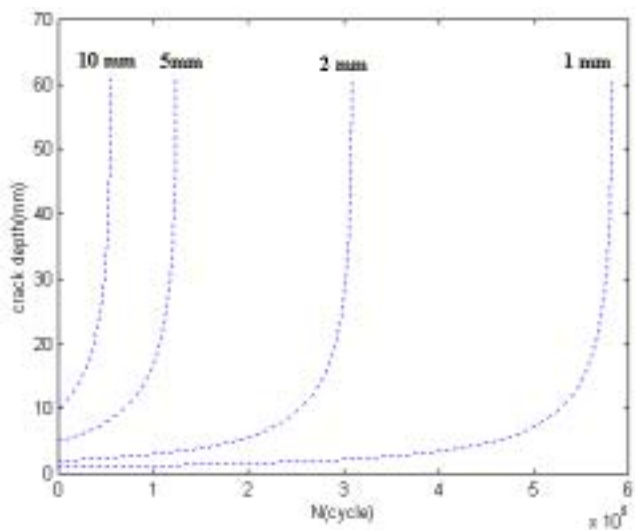


그림 6 초기결함의 영향

3.4 초기결함크기의 영향

손상허용설계에 있어서 결함이 검출되지 않은 경우 검사법 고유의 검출한계에 해당하는 치수의 균열이 존재하는 것을 가정하여 잔여수명을 보증한다. 여기에서, 검출한계로는 충분히 높은 확률로서 검출

할 수 있는 결함의 치수라는 의미이다. 바꾸어 말하면 허용하여 얻는 만큼 놓치는 확률이 적다

검사방법의 검출감도가 높은 만큼 가정할 수 있는 초기 결함치수는 작게 된다. 초기 균열깊이를 1 mm~10 mm 의 범위로 변화시킨 경우의 잔여수명의 변화를 나타낸 것이 그림 6에 있다. 검출한계가 10mm에서 1 mm로 향상되는 것에 따라 보증할 수 있는 잔여수명이 증가한다.

검출한계가 2 mm와 1 mm의 경우를 비교하여도 보증수명은 배정도 다르게 된다. 이 결과는 결함검사 방법의 고도화에 따라 요구되는 검사간격을 현저하게 연장시킬 수가 있다는 것을 의미한다. 특히, 차륜 내부 결함과 차축 압입부 등 외부에서 직접 관찰할 수 없는 부위에 적용할 수 있는 감도 좋은 비파괴검사 방법이 개발되면 보증수명은 큰 폭으로 연장될 수 있다.

3.5 임계 결함크기

그림 7과 그림 8는 작용응력에 따른 고속도용 차륜재의 임계균열깊이를 보여준다. 100 MPa의 응력이 작용할 때, 고속도용 차륜재의 실온에서 파괴인성치 $82 \text{ MPa m}^{0.5}$ 일 경우 차륜재는 균열깊이 34 mm에 도달하게 되면 파괴가 이르게 된다. 저온에서는 균열이 29 mm에 도달하게 되면 차륜재는 파손이 일어나게 된다. 이것은 차륜재 림부 두께의 1/2에 이르게 되면 임계점을 가지게 된다는 의미이다. 그러나 극한 하중이 작용하는 경우, 실온의 파괴인성치에 따른 임계균열깊이는 7 mm 로서 10 mm이하의 균열깊이에서 파손에 이르게 된다. 따라서 차륜재의 피로설계시 저온 파괴인성 특성을 고려하여 손상허용설계 실시해야 할 것이다.

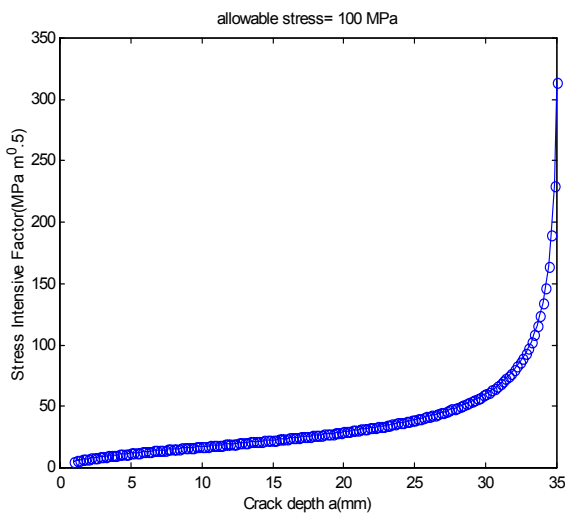


그림 7 임계결함깊이(작용응력=100 MPa)

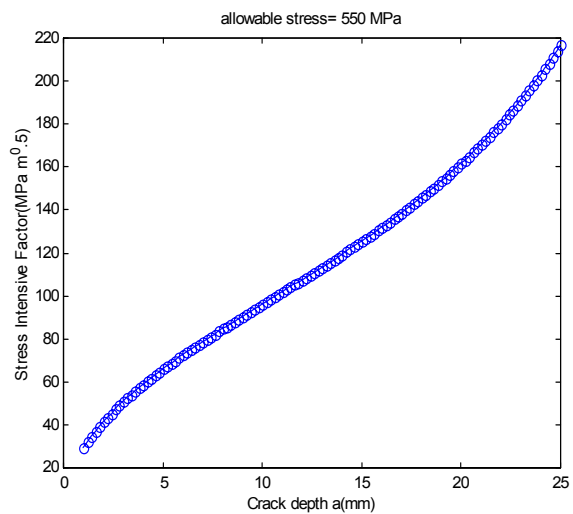


그림 8 임계결함깊이(작용응력=550 MPa)

4. 결론

파손시나리오에 따른 고속도용 차륜의 파괴역학적 안전성을 수치모델을 이용하여 평가한 결과, 초기 결함 2 mm에서 파단까지의 수명은 3×10^5 cycles 이며 임계결함깊이는 30 mm이다. 그러나, 과대하중과 저온취성에 대한 특성을 고려하여 피로설계를 실시해야 하며 또한, 재료특성, 실동응력, 결함검사의 3가지 항목에 관련한 연구가 차륜의 신뢰성 보증에 있어서 중요하다.

참고문헌

- [1] R.A.Smith, Monitoring Fatigue in Railway Axle, 13th International Wheelsets conference, 2001
- [2] S.Cantini, A.Ghidini, Safe life inspection intervals of railway 15th Wheelset Congress, 2006
- [3] F.Bumbieler, R.Hamam, Simulation of fatigue cracks propagation, 15th Wheelset Congress, 2006
- [4] S.J.Kwon, D.H.Lee, Characteristics of Wheel Tread for Property Improvement , ICEM, 2006
- [5] J.C.Newman, I.S.Raju, SIF Equations for crack, Computational Methods in FM, 1986