

철도차량용 휠과 레일의 피로균열시작 수명에 관한 연구

Study on the fatigue crack initiation life in rail wheel contact

김태완* 설광조** 조용주***

Kim, Tae-Wan Seori, Kwoang-Jo Cho, Yong-Ju

ABSTRACT

In this study, contact fatigue in wheel-rail contact is simulated. It is necessary to calculate contact stress and subsurface stresses accurately to predict fatigue behavior. Contact stresses are obtained by contact analysis of semi-infinite solid based on influence function and subsurface stress field obtained by using rectangular patch solutions. Based on these stress values, several multiaxial high-cycle fatigue criteria are used and the critical loads corresponding to fatigue limits are calculated. The simulation results show that the critical load is decreasing rapidly and the site of crack initiation also moves rapidly to the surface from the subsurface when friction coefficient exceeds a specific value for all of three fatigue criteria

1. 서론

철도차량은 다수의 인적, 물적자원의 고속수송 수단으로서 현재와 같은 보급 발전을 가져왔다. 이런 발전과 더불어 최근 경의선과 동해선 철도의 연결 사업으로 '철의 실크로드' 가능성이 현실로 다가 왔으며 한반도 종단철도(TKR)를 완벽하게 구축하게 되면 시베리아횡단철도(TSR)와의 연계 망을 통해 한반도가 동북아의 물류 중심지로 부상할 수 있는 기반을 다질 수 있게 되었다. 철도차량이 수송이라는 서비스 영역을 확보하고 발전시키기 위해서는 대량수송, 고속화와 더불어 안정성이라는 측면을 중시하게 된다. 안정성 측면에서 철도차량을 본다면 휠과 레일의 접촉은 아주 큰 비중을 차지하며 이의 파손은 큰 인적 물적 피해로 이어지게 된다. 실제로 이들 파손으로 인한 대형사고가 일어난 예가 많으며 이는 휠과 레일의 반복된 접촉으로 인하여 마모와 피로균열이 생겨서 발생한 경우이다. 따라서 본 연구에서는 이들 접촉부의 피로특성을 연구하고자 한다.

* 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원

** 부산대학교 정밀기계공학과

*** 부산대학교 기계공학부 교수

2. 접촉 해석

2.1 접촉모델

실제 휠 과 레일의 접촉은 레일설치 기울기와 궤도의 반경에 따라 달라지고 복잡해진다. 본 연구에서는 휠 과 레일헤드의 곡률반경만을 고려해 타원접촉으로 가정하고 접촉해석을 하였다. 그림

1. 과 같은 휠 과 레일의 접촉을 그림 2. 와 같이 가압 하는 강체 상당표면(Rigid body equivalent surface)과 반 무한탄성체로 모델링 하였다.

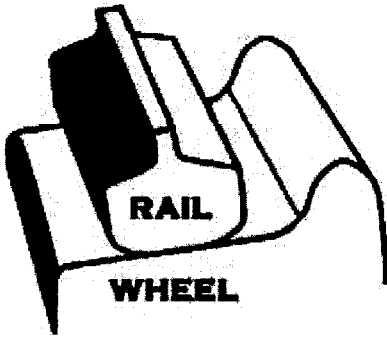


그림 1. Contact of wheel - rail

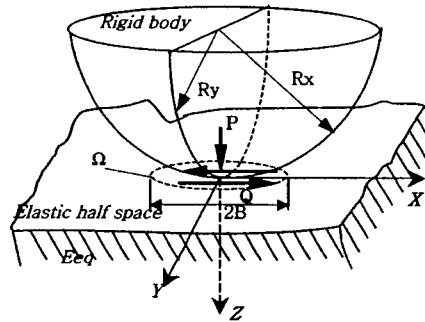


그림 2. Equivalent contact model

2.2 접촉해석

접촉문제의 해석에서는 보다 효율적으로 쓰일 수 있는 사각조각 표면에 대한 Love의 수직 분포하중에 의한 변위 해[6]와 Cho 등의 접선 분포하중에 대한 변위 해[1]를 이용하여 수치적으로 접촉압력과 표면아래 응력 분포를 구하여 여러 피로모델을 이용하여 피로특성을 검토하였다. 그림 3. 에서는 표면 접촉압력을 보여주고 있으며 그림 4.와 그림 5. 에서는 각각 마찰계수에 따른 최대 응력발생 깊이와 표면아래 응력을 보여주고 있다. 마찰계수가 커짐에 따라 약 $\mu=0.35$ 를 기준으로 최대 표면 압력의 위치가 표면으로 급격히 이동하는 것을 알 수 있다.

3. 피로모델

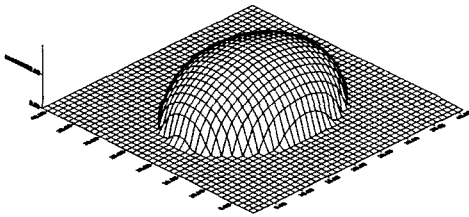


그림 3. Contact pressure at surface

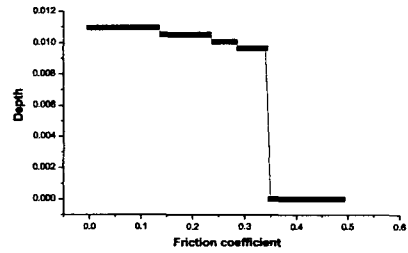


그림 4. Depth of maximum stress

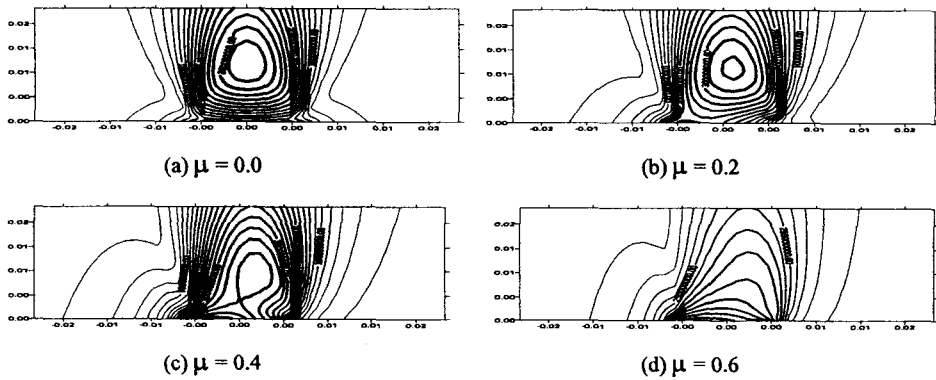


그림 5. Contour of $\sqrt{J_2} / P_o$ on plane $y=0$ according to friction coefficient

3.1 임계평면 이론(Critical Plane Approach)

임계평면에 대한 여러 형태의 이론이 제시되었지만, 그 적용 절차는 비슷한 순서를 따른다. 먼저 임계평면을 정의하고 그 정의에 해당되는 임계 평면을 구한다. 그리고 그 평면의 응력량을 조사하여 피로 조건이 만족하는지 확인한다. 만약 그 평면이 피로 조건을 넘어서게 되면 그 평면에서 균열이 시작된다고 할 수 있다. 그러므로 균열이 시작되는 방향과 임계평면의 방향은 일치한다고 할 수 있다. 임계평면이 정의되면 한 점을 통과하는 여러 면을 분석하여 임계평면을 결정하게 된다. 하지만 재료의 모든 점들을 분석해야 하고 또 한 점에서 여러 방향을 분석해야 하므로 많은 계산 시간이 소요된다. 본 연구에서는 Mataka[7]의 피로모델을 적용하고자 한다. Mataka 조건은 임계평면에 작용하는 와의 선형 조합으로 구성되어있다. 이 조건에서는 전단 응력의 진폭이 최대가 되는 면을 임계평면으로 정의한다.

$$(\phi_c, \theta_c) : \max_{(\phi, \theta)} \{C_a(\phi, \theta)\} \quad (\text{식. 1})$$

여기서 (ϕ_c, θ_c) 는 임계평면에 해당하는 (ϕ, θ) 값을 나타낸다. 피로조건은 다음과 같다.

$$C_a(\phi_c, \theta_c) + \kappa N_{\max}(\phi_c, \theta_c) \leq \lambda \quad (\text{식. 2})$$

여기서 κ 와 λ 값들은 순수 완전 반복 비틀림을 주는 경우와 완전 반복 굽힘을 주는 경우의 피로한도이며 다음과 같다.

$$\kappa = (2t_{-1} / f_{-1}) - 1 ; \quad \lambda = t_{-1} \quad (\text{식. 3})$$

식. 2의 부등식을 만족하게 되면 균열이 발생하지 않게 되어 무한수명이 된다.

3.2 응력 불변량(stress invariant)을 이용한 이론

응력 불변량을 이용한 피로 조건은 정수압 응력과 편차응력의 이차 불변량을 사용하여 표현된다. 본 연구에서는 Crossland[2]의 피로 조건 식을 이용하였고 다음과 같다.

$$\sqrt{J_{2,a}} + \kappa \Sigma_{H,\max} \leq \lambda \quad (\text{식. 4})$$

여기서 κ 와 λ 는 순수 전단 실험과 반복 굽힘 실험으로 구할 수 있다.

$$\kappa = (3t_{-1} / f_{-1}) - \sqrt{3} , \quad \lambda = t_{-1} \quad (\text{식. 5})$$

Crossland 피로식의 경우도 식. 4 를 만족하게 되는 조건에서 무한수명이 된다.

3.3 Mesoscopic 접근법에 의한 피로 조건

금속의 피로 거동은 여러 가지 영역(scale)으로 분석될 수 있다. 공학에서 사용되는 영역은 재료를 연속체로 볼 수 있는 범위 즉 macro-영역을 주로 사용한다. 지금까지 제시된 피로 조건 식은 이 영역에 해당한다. 본 연구에서는 micro-와 macro- 영역의 중간 범위에서 재료의 피로거동을 분석해 보고자 한다. 이러한 영역을 meso- 영역(mesosopic scale)이라고 하며, 금속의 결정(grain) 크기의 영역에 해당된다. meso- 접근법은 70년대 초반에 Dang Van[3],[5] 에 의해 소개되었다. 본 연구에서는 Dang Van이 제시한 피로 모델을 이용하였다. 그가 제시한 조건은 macro-영역의 응력 싸이클(engineering stress)에 근거하여 계산되어 진 각각의 시간에 해당하

는 meso- 응력 요소들을 사용하여 구성되어 있다. 이 조건에 의하면 피로 파괴는 의 조합으로 나타난 궤적이 안정영역으로 정의된 영역을 벗어 날 때 일어나게 된다. 여기서 $\tau(t)$ 와 $p(t)$ 는 각각 meso- 영역의 전단응력과 정수압 응력을 나타낸다. 안정영역은 두 개의 직선으로 구성되어 있고, 다음과 같이 정의된다.

$$g(\sigma) = \tau(t) \pm \kappa p(t) \mp \lambda = 0 \quad (\text{식. 6})$$

여기서 κ 와 λ 는 다음과 같다.

$$\kappa = (t_{-1} - f_{-1}/2)/(f_{-1}/3) ; \quad \lambda = t_{-1} \quad (\text{식. 7})$$

meso- 요소인 σ 와 ε 은 특정 방향의 결정에서 하중 $F(t)$ 의 함수로 계산되어 진다. Macro- 요소와 meso- 요소의 관계는 참고문헌 [3,5] 에 주어져 있다.

3.4 해석결과

앞에서 설명한 내용에 기초하여 접촉해석을 수행하였으며, Mataka 조건과 Crossland 조건 그리고 Dong Van 조건을 피로 해석에 각각 적용하였다. 본 해석에서 대상이 된 휠 과 레일은 SSW1 과 60kg rail 이며 굽힘 및 비틀림 피로한도는 각각 328 Mpa, 187 Mpa 값을 해석에 이용하였다.

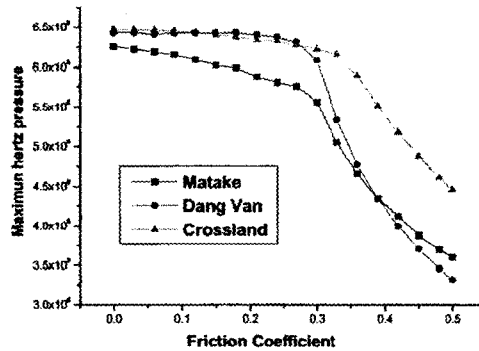


그림 6. Critical force of various criteria against friction coefficient

그림 6.은 세 가지 조건에 대하여 마찰 계수 변화에 따른 피로한도에 해당하는 임계하중을 나타내고 있다. 세 조건이 다른 물리적 접근방법을 사용하였지만 마찰계수의 증가에 따라 임계하중이

감소하는 비슷한 경향을 나타낸다. Crossland 조건이 다른 두 조건 보다 비교적 높은 임계하중을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 철도차량용 휠과 레일의 접촉으로 가정한 후 접촉해석을 수행하였으며 이를 기초로 하여 여러 피로모델을 적용하여 그 피로특성을 파악하였으며 결과는 다음과 같다.

1. 각각의 피로조건은 서로 다른 접근 방법을 취하고 있지만 마찰계수에 변화에 대한 무한 수명의 임계하중의 변화 양상이 비슷한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 특정 마찰계수 이상에서는 최대 압력 발생위치가 표면으로 급격히 이동하는 것을 알 수 있었다.

2. 마찰계수가 증가함에 따라 피로한도에 해당하는 임계하중이 급격히 감소하였고 이는 세 조건 모두 이러한 현상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

참고문헌

1. 조용주, 이문주 (2000), "반 무한체위의 사각조각 표면에 작용하는 점선하중에 의한 반 무한체 내의 응력해석," 대한기계학회논문집, A권, 제24권, pp.149-150.
2. Corssland, B. (1956), "Effect of Large Hydrostatic Pressure on The Torsional Fatigue Strength of An Alloy Steel", Pro. Int. Conf. on Fatigue of Metals, Institution of Mechanical Engineers, London, pp. 138-149.
3. Dang Van K., Griveau B., and Message O. (1985), "On A New Multiaxial Fatigue Criterion; Theory and Application", 2nd Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue, Sheffield, UK.
4. I.V. Papadopoulos (1994), "A New Criterion of Fatigue Strength for Out-of-Phase Bending and Torsion of Hard Metals", Int. J. Fatigue, Vol. 16, pp. 377-384.
5. Ky Dang Van (1999), "High-Cycle Metal Fatigue From Theory to Applications", SpringerWienNewYork.
6. Love. A. E. H. (1929), "Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on art of the Boundary", *Phil. Trans. Royal Society*, A228, pp.377-420.
7. Matake, T. Bull (1977), JSME Vol. 20, No. 25