도시철도 차륜의 접촉피로 초기수명 평가

안종곤[†] · 유인동 · 권석진* · 김호경^{***}

서울과학기술대학교 철도전문대학원, 박사과정

*한국철도기술연구원

^{***}서울과학기술대학교 자동차공학과

Estimation of Contact Fatigue Initiation Lifetime of an Urban Railway Wheel

Jong-Gon Ahn[†], In-Dong You, Seok-Jin Kwon* and Ho-Kyung Kim^{***}

Ph.D. Candidate, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology

*Korean Railroad Research Institute

^{***}Dept. of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received January 3, 2012; Revised January 26, 2012; Accepted January 27, 2012)

Abstract – Rolling contact fatigue of an urban railway wheel was analysed during its rolling. A FEM analysis was performed using a 3D modelling of rail and wheel, considering the slope of the rail and nonlinear isotropic and kinematic hardening behavior of the rail and the wheel. The maximum von-Mises stress and contact pressure between the rail and wheel were 656.9 MPa and 1111.4 MPa, respectively, under axial load of 85 kN with friction coefficient of 0. The fatigue initiation life prediction relationships by strain-lifetime (ϵ -N) and Smith-Watson-Topper method were drawn for the wheel steel as follows: $N_i = 7.35 \times 10^6 \times SWT^{-3.56}$

and $N_i = 5.41 \times 10^{-9} \times \left(\frac{\Delta \epsilon}{2}\right)^{-5.77}$. The fatigue lifetimes of the wheel due to rolling contact were determined to be infinite by ϵ -N and SWT methods.

Keywords – railway wheel (철도차륜), rolling contact fatigue(구름접촉피로), multiaxial fatigue(다축피로), contact pressure (접촉응력)

1. 서 론

철도차륜은 차량전체의 무게를 지지하는 역할을 하면서 동시에 레일 위를 이동하는 중요한 장치이다. 주행 중에 레일과의 상호작용에 의하여 마모가 필연적으로 발생하지만, 그 이외에도 박리, 찰상, 함몰, 미세균열 등의 원인으로 인한 차륜 담면에 손상이 발생한다[1]. 철도차량 차륜이 손상이 발생할 경우 승차감, 소음, 레일 손상, 주행안전성 감소 등의 원인이 된다. 따라서

차륜의 건전성을 유지하며 기대수명 이상 사용으로 유지보수 비용을 줄이는 측면에서 구름접촉에 의한 차륜 손상 평가에 대한 연구가 필요하다.

철도 차륜의 구름접촉에 관한 연구는 국외에서는 많은 연구[2-4]가 진행되고 있다. 구름접촉 연구는 크게 구름에 의한 응력 및 변형률 분포에 초점을 맞춘 연구와 구름에 의한 피로 및 마모 현상을 다루고 있다. 예를 들어 김청균은 레일-휠 접촉면 경사도에 따른 응력-변위량의 거동에 관한 연구를 통하여 레일의 설치 기울기에 따른 접촉응력 해석을 통해 레일-휠 접촉면의 구름마찰조건에서 레일의 경사도와 휠의 표면 기울기는 중요한 설계변수라는 것을 규명하였다[2]. Sraml 등은

[†]주저자 : a332350@seoulmetro.co.kr

^{*}책임저자 : kimhk@seoultech.ac.kr

차륜의 구름 접촉시 마찰계수 변화에 따른 피로수명을 2차원으로 해석을 수행하여 다양한 다축응력 피로 수명법을 적용하여 차륜의 피로발생 수명을 평가하였다[3]. Liu 등은 차륜에서의 접촉피로에 의한 표면에서의 균열전파거동에 관하여 3차원 해석을 수행하여 혼합모드 조건에서의 유효응력확대계수를 적용시 균열전파속도의 적절한 예측이 가능함을 제시하였다[4].

그러나 이들 연구들의 대부분은 레일과 차륜의 접촉면에서의 변형을 단순히 완전탄성변형 혹은 완전 소성 변형 거동으로 해석을 수행하여 실제 변형거동을 충분히 반영하지 못하였다. 또한 차륜과 레일을 2차원으로 해석을 함으로써 레일과 차륜 사이의 일정한 경사도를 반영하지 못함으로 인하여 접촉부의 응력이 높게 산정되는 경향이 있다. 또한 차륜의 구름 접촉시의 피로 발생 수명에 관한 연구에서도 해석대상 차륜의 재료 물성치나 차륜 형상을 적용하는 것이 아닌 일반적인 차륜의 재료 물성치를 인용하거나 차륜의 접촉시의 응력을 헤르츠 식을 적용하여 수명을 예측하는 기법을 제시하는 연구가 대부분이다. 그러나 산업체에서 차륜을 설계하거나 현장에서 차륜의 유지보수를 위해서는 대상 차륜의 형상에 대하여 구조해석을 통하여 응력 및 변형률을 결정하고 이를 대상 차륜의 기계적 물성치를 평가하여 수명을 평가하는 체계적인 절차가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 도시철도 전동차의 차륜의 구름접촉에 대하여 구조해석을 통하여 응력 및 변형률을 해석하고 이미 다른 연구에서 평가한 해당 차륜에 대한 기계적 물성치를 적용하여 차륜의 피로균열 발생 수명을 예측하고자 한다. 이를 통하여 도시 철도 전동차 차륜의 구름접촉에 의한 피로측면에서의 안전성을 검증하며 이와 같은 체계적인 검증방법을 본 연구에서 제시하고자 한다. 이를 위하여 차륜과 레일의 경사도를 고려하여 3차원 유한요소해석을 수행하여 차륜과 레일의 구름 접촉 시 응력분포 및 손상을 평가하고자 한다. 레일과의 구름접촉에 의한 차륜의 균열 발생 손상을 예측하기 위하여 전동차 실제 운행차륜의 기계적 물성치 및 운행 데이터를 분석하여 변형률-수명 및 Smith-Watson-Topper (SWT) 예측법을 적용하였다.

2. 차륜과 레일의 접촉압력 이론적 해

철도 차륜과 레일의 접촉에 의해 발생하는 압력을 Hertz 탄성 접촉 이론을 바탕으로 Fig. 1과 같이 최대 접촉압력을 도출할 수 있다. 차륜과 레일사이에 수직하

Fig. 1. Wheel-rail contact area.

중이라도 가해지기 시작하면 접촉점 부근에서는 변형이 일어나고, 이 미소 접촉면은 타원으로 가정할 수 있다. 접촉하중 W 가 작용하는 철도차륜과 레일에 탄성접촉이 발생시 철도 차륜과 레일의 접촉에 의해 발생하는 최대접촉압력 P_{max} 을 아래의 식으로 도출할 수 있다[5].

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad (1)$$

$$a = m^3 \sqrt{\frac{3\pi W(k_1 + k_2)}{4(A+B)}} \quad (2)$$

$$b = n^3 \sqrt{\frac{3\pi W(k_1 + k_2)}{4(A+B)}} \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (5)$$

여기서 접촉하는 철도차륜과 레일의 포아송비 ν , 탄성계수 E 가 같다면, $E_1 = E_2$, $\nu_1 = \nu_2$ 이다. 타원 접촉면적의 장축 $2a$ 와 단축 $2b$ 의 비례상수인 m 와 n 의 계수 값은 Table 1을 이용하여 계산할 수 있다. 접촉운동을 하는 두 물체에서 접촉면의 기울어진 각도인 θ 는 다음의 식으로부터 구해진다.

$$A+B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \quad (6)$$

$$A-B = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2} + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos(2\psi) \quad (7)$$

Table 1. α and β according to θ [5]

θ	m	n	θ	m	n
20	3.778	0.408	60	1.486	0.717
30	2.731	0.493	65	1.378	0.759
35	2.397	0.530	70	1.284	0.802
40	2.136	0.567	75	1.202	0.846
45	1.926	0.604	80	1.128	0.893
50	1.754	0.641	85	1.061	0.944
55	1.611	0.678	90	1.000	1.000

$$\cos(\theta) = \frac{B-A}{A+B} \quad (8)$$

차륜과 레일의 $1/R_1' = 1/R_2' = 0$ 이다. 차륜과 레일의 곡률 반지름이 이루는 각도 ψ 는 $\pi/2$ 이며, $R_1 = R_w$, $R_2 = R_r$ 으로 설정하고 접촉하는 철도차륜과 레일의 포아송비, 탄성계수가 같다면, $E_1 = E_2$, $\nu_1 = \nu_2$ 이다. 그리고 W 는 차륜과 레일의 접촉면에 가해지는 힘으로 85 kN으로 가정하였으며, 차륜의 반경 $R_w = 430$ mm, 레일의 차륜과의 접촉부의 곡률반경 $R_r = 300$ mm일 경우, $A + B = 0.00283$, $B - A = 0.0005$ 로 부터 각도 θ 는 79.7° 에 해당한다. 식(2), (3)을 적용하면 $a = 6.54$ mm, $b = 5.18$ mm이며 이때 최대 접촉압력은 식(1)을 적용하여 $P_{\max} = 1198.1$ MPa로 계산된다.

Hertz 공식을 통하여 이론적으로 도출한 최대접촉압력은 차륜과 레일이 실제적으로 접촉하게 되면, 차륜과 레일은 운행하면서 마모되기 때문에 접촉면 면적이 증가하며 차륜 담면 및 레일의 경우 일정한 기울기로 설치되어 운행함으로 이로 인해 최대접촉압력은 변할 것으로 판단된다. 또한 차륜과 레일간의 마찰계수와 완전탄성이 아닌 탄소성 변형이 접촉부에서 발생하여 접촉응력은 낮아질 것으로 판단된다. 따라서 차륜과 레일의 접촉 해석시 3차원 해석을 통하여 두 물체간의 설치 경사도를 고려하며 두 물체의 재료거동을 완전탄성이 아닌 탄소성 변형 거동으로 설정하여 해석하는 것이 필요하다.

3. 유한요소해석

3-1. 해석 모델 및 물성치

차륜과 레일간의 접촉문제 해석을 위해 3차원 유한요소 모델을 사용하였다. 도시철도 전동차의 차륜과 본

Fig. 2. Wheel/rail contact model for FE analysis.

선에 쓰이는 UIC50으로 구성된 해석 모델은 Fig. 2와 같으며, 해석 시간의 단축과 효율성을 위해 실제 해석에서는 차륜의 1/4모델을 사용하였다. 레일 길이는 600 mm로 모델링하였다. 차륜 담면 및 레일의 경사도는 각각 $1/20$ 로 모델링하였다.

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였으며, FE 모델을 pre-processor인 Hyper-Mesh를 사용하여, SOLID 요소인 C3D6, C3D8 요소로 구성하였다. 전체모델의 절점 수는 229231, 요소 수는 215742개로 구성되었다. 응력 성분이 크게 변하는 접촉부위는 요소 크기를 1 mm로 조밀하게 분할하였다. 접촉해석을 위하여 master 및 slave 접촉요소는 각각 차륜 및 레일의 접촉영역으로 설정하였다. 차륜의 수직력과 접선력을 작용하기 위하여 1단계로 수직하중을 작용시킨 상태에서의 해석 후에 2단계로 수직력에 마찰계수를 곱한 접선력을 작용하는 방식으로 해석을 수행하였다.

철도차륜과 레일의 재료물성치는 동일하다고 가정하였으며 탄성계수는 210 GPa, 포아송비는 0.3으로 가정하였다. 차륜과 레일 변형거동은 비선형 등방성이며 유동성 경화 (kinematic hardening)[6]로 가정하였으며, 차륜의 담면부에서 채취한 인장시험편의 인장 실험 데이터를 ABAQUS[6]에 입력하여 설정하였다. 데이터

Fig. 3. Engineering and true stress-strain curves of railway wheel steel.

확보를 위하여 신차륜의 답면부에서 게이지 길이 15.6 mm, 게이지부 직경 5 mm, 총길이 85 mm의 인장시험편에서 채취하여 가공하였으며 인장시험은 1 mm/분의 속도로 실험을 하였다. 입력한 인장 실험결과는 Fig. 3과 같다. 작용하중(W)은 85 kN을 적용하였다. 철도차륜과 레일간의 마찰계수 $\mu=0, 0.2$ 에 대하여 해석을 수행하였다.

4. 응력해석결과 및 피로수명평가

4-1. 응력해석 결과

차륜-레일간 구름접촉에 대한 마찰계수 $\mu=0.0, 0.2$ 에 따른 차륜의 응력분포 변화를 해석하였다. Fig. 4는 마찰계수 0.2에서의 von-Mises 응력분포를 거시적 및 접촉부위에 대한 상세한 부분을 나타낸 그림이다. 접촉시 단면에서의 응력을 살펴보면 차륜과 레일의 접촉영역에서만 크게 나타나고, 차륜의 스포크 및 레일의 복부 부분의 응력은 접촉위치에 비해 무시할 만큼 작게 나타나고 있다. 차륜과 레일 접촉부의 von-Mises 최대응력은 656.9 MPa로 차륜재의 항복응력 626.7 MPa보다 높게 발생하였다.

마찰계수를 0과 0.2로 가정하여 응력해석을 한 결과 최대접촉압력분포의 경우 마찰계수를 0과 0.2일 경우 각각 1111.4 MPa, 1092.4 MPa로 마찰계수의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 사실은 Guo

Fig. 4. Von-Mises stress distribution of the wheel-rail contact at $\mu=0.2$.

Fig. 5. (a) Contact pressure 3D distribution on the contact surface and (b) contact area.

등의 연구 [7]와 일치한다. Guo 등 [7]은 차륜을 모사한 구름접촉에 의한 마찰계수의 변화에 대하여 마찰계수의 약간의 증가에 대한 응력의 변화 및 이로 인한 피로손상의 영향은 미비한 것으로 평가하였다.

Fig. 5(a)는 마찰계수 0인 조건에서 접촉위치에서의 압력분포도를 3차원으로 나타낸 그림이다. 최대 접촉압력은 1111.4 MPa로 완전탄성상태로 가정하여 Hertz 접촉이론에 의해 차륜과 레일의 접촉압력을 구한 1198.1 MPa보다 7.2% 만큼 낮게 나타났다. 레일과 차륜의 기울기를 고려하지 않고 완전탄성상태만을 고려한 이론식에 비해 FEM 해석에서는 기울기와 두 물체의 탄소성상태까지 고려한 상황에서 결과 값의 차이가 발생한 것으로 판단된다. Fig. 5(b)는 접촉압력면을

Fig. 6. Comparison of contact pressure distribution on the contact surface in longitudinal direction determined by Hertz theory and FEM analysis with $\mu = 0$.

2차원으로 나타낸 그래프로 이를 통하여 레일길이 방향에 해당하는 x 방향의 경우 좌우가 대칭임을 알 수 있다. 접촉면적의 형상은 3차원으로 탄소성 거동으로 해석한 다른 연구의 형상과 유사하였다[8]. 3D FEM 해석결과는 접촉면의 타원형 장축과 단축 반경인 $a = 7.5 \text{ mm}$, $b = 6.3 \text{ mm}$ 로 나타나 Hertz이론의 경우의 $a = 6.54 \text{ mm}$, $b = 5.18 \text{ mm}$ 에 비하여 약간 큰 것으로 나타났다. Fig. 6은 길이방향의 y축상의 접촉압력에 대한 분포도를 Hertz 이론과 3D FEM 해석을 통하여 비교하였다. 그림을 통하여 탄소성 변형을 고려한 FEM 해석에서는 Hertz 탄성이론식의 분포와 유사하여 본 FEM해석이 적절하게 수행되었음을 암시하고 있다 또한 FEM해석 결과가 Hertz 탄성이론식에 의한 접촉압력에 비하여 최대접촉압력이 약간 작으며 소성변형 등에 의하여 접촉면이 좀 더 넓고 완만하게 상승하면서 분포함을 알 수 있다.

통상적으로 Tresca 응력은 접촉에 의한 피로 발생위치 분석에 적절한 예측이 가능한 것으로 알려져 있다. Fig. 7은 접촉응력 해석 결과인 마찰계수 0, 0.2에 대한 Tresca 응력 분포도이며, 전동차 전진 방향인 차륜구름 방향은 우측에서 좌측방향 이동으로 가정하였다. Fig. 7(a)에서 마찰계수가 0인 경우 최대응력은 672.1 MPa로 깊이 (z 방향) 3.07 mm에 위치함을 알 수 있다. 그러나 마찰계수가 0.2로 증가하면서 Fig. 7(b)와 같이 최

Fig. 7. Tresca stress distribution by the frictional coefficient $\mu=0$ (a) and 0.2 (b).

대응력의 크기는 673.4 MPa로 거의 동일하며 최대 위치깊이도 거의 동일함을 알 수 있다. 다만 차륜 진행 반대방향으로 최대 응력 위치의 쏠림 현상이 발생함을 알 수 있다.

4.2. 피로수명 예측식 도출

구름접촉에 의한 차륜의 균열발생 수명을 예측하기 위하여 다축응력상태에서의 피로수명을 예측하는데 적절하다고 알려진 Smith-Watson-Topper (SWT) 식과 변형률 식에 의한 수명평가 해석을 수행하였다. 우선 두식을 도출하기 위해서는 차륜재 담면부위에 대한 피로 및 인장 물성치가 필요하다. Fig. 3은 차륜재 담면부의 공학적 응력과 진응력 대비 공학적 변형률과 진 변형률로 작성한 선도이다. 공학적 응력과 변형률 선도를 통하여 최대 인장강도 및 항복강도는 각각

1027.7 MPa, 626.7 MPa이며 연신율은 40.4%로 나타났다. 또한 진응력과 진변형률 선도를 통하여 최대강도는 1319.5 MPa, 연신율은 33.9%로 나타났다.

구름접촉에 의한 차륜의 균열 발생 손상을 예측하기 위하여 일반적으로 Coffin-Manson 관계식으로 알려진 변형률-수명 ($\epsilon-N$) 예측법을 적용한다. 변형률-수명 관계식을 파단수명의 항으로 표현하면 식 (9)와 같다[9].

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{2} = \frac{\sigma_a}{E} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (9)$$

여기서, $\frac{\Delta \epsilon_1}{2}$ 는 최대주변형률폭, σ_a 는 응력진폭, $\Delta \epsilon_p$ 는 소성 변형률 범위이다. σ'_f 는 피로강도계수, ϵ'_f 는 피로연성계수, $2N$ 은 파괴시까지의 반복수, b 와 c 는 각각 피로강도지수, 피로연성지수, E 는 탄성계수이다. 변형률-수명 선도 작성을 위하여 본 연구에서는 Fig. 3의 진응력-변형률 선도를 이용하여 물성치를 적용하여 피로강도계수 $\sigma'_f \approx \sigma_f = 1319.5$ MPa이며 피로연성계수 $\epsilon'_f \approx \epsilon_f = 0.339$ 로 결정하였다. 피로강도지수 b 는 본 연구에서 사용한 차륜재 담면에서 채취한 시험편으로 본 연구자가 피로실험[10]을 통하여 얻은 -0.072로 결정하였다. 또한 통상적인 피로연성지수 c 값은 -0.5~ -0.7 범위에 있다. 연신율이 1에 가까운 연성이 큰 금속에서는 평균값인 -0.6, 연신율이 0.5 정도에 해당하는 금속에서는 -0.5를 적용하는 것이 적당하다는 연구 [9]를 기초로 본 차륜재에서는 $c = -0.5$ 로 적용하였다. Table 2에 본 차륜재의 인장 및 피로 물성치를 요약하였다.

또 다른 다축응력상태에서의 피로수명을 예측하는 Smith-Watson-Topper(SWT) 식 (10)에 의한 수명평가 해석을 수행하였다.

$$\sigma_1^{\max} \frac{\Delta \epsilon_1}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (10)$$

여기서 $\Delta \epsilon_1$ 은 변형률 진폭, $\sigma_{\max}$ 은 최대 국부응력(maximum local stress)으로 최대주변형률이 발생하는 지점에서의 최대응력, E 는 탄성계수, $2N$ 은 피로수명이다. 그러나 최대주변형률($\Delta \epsilon_1/2$)이 작용하는 위치에서 최대주응력($\sigma_1^{\max}$)이 음의 값을 갖게 되어 이 피로 매개변수(FP, fatigue parameter)는 주로 인장하중이 작용하는 부재에 적용되며 구름접촉의 경우 대부분 최대주응력($\sigma_1^{\max}$)이 음의 값을 나타내므로 이를 해결하는 전단하중이 지배하는 피로 매개변수를 적용하였다. Jiang-Sehitoglu의 식에 따르면 식(10)의 왼쪽항에 해당하는

피로매개변수는 다음과 같이 정의된다[11].

$$FP = \left\langle \frac{\Delta \epsilon}{2} \sigma_{\max} \right\rangle + J \Delta \gamma \Delta \tau \quad (11)$$

여기서 $\Delta \epsilon$ 은 균열이 발생하는 임계면에서의 주변형률폭, $\sigma_{\max}$ 은 임계면에서의 최대주응력, $\Delta \gamma$ 는 공학적 전단변형률 폭, $\Delta \tau$ 는 전단응력 폭, J 는 재료상수로 0.2로 가정하였다. $\langle \rangle$ 는 McCauley 괄호로 만일 $a > 0$ 이며 $\langle a \rangle = a$ 이고 $a \leq 0$ 이면 $\langle a \rangle = 0$ 이다. 따라서 본 차륜 접촉피로의 경우 $\sigma_{\max} \leq 0$ 이므로 가 된다. 따라서 Jiang-Sehitoglu의 피로매개변수를 적용하면 다음의 식 (12)와 같이 표현이 가능하다.

$$J \Delta \gamma \Delta \tau = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (12)$$

구름접촉에 의한 차륜의 균열 발생 손상을 예측하는 식으로 탄성 shake-down에 해당하는 고주기 피로에 의한 손상 조건에서 일반적으로 다음 식(13)과 같은 Dan Van식 [12]을 적용한다.

$$|\tau_a(t) \pm \alpha_{DV} \sigma_b(t)| \leq \tau_e \quad (13)$$

여기서 $\tau_a(t)$ 는 최대전단응력진폭, $\sigma_b(t)$ 는 정수압력, α_{DV} 는 재료상수, τ_e 는 전단피로한도이다. 따라서 전단응력진폭과 정수압의 합이 재료의 피로한도보다 크면 피로가 누적되어 피로손상이 발생한다. 이때 Dan Van의 재료상수 α_{DV} 는 이축 전단 및 일축 하중상태에서의 피로한도 비와 관계하는 재료상수로 0.38로 결정되었다[10].

차륜과 레일의 구름 접촉에 의한 응력 해석 결과를 토대로 한 차륜재의 SWT 매개변수-수명 선도 및 변형률-수명 선도는 각각 Fig 8, Fig 9와 같으며 식 (9), (12)에 Table 2의 차륜재의 기계적 물성치를 적용한 차륜에 대한 다음과 같은 피로수명 산출식 (14), (15)를 도출하였다.

$$N_i = 7.35 \times 10^6 \times SWT^{-3.56} \quad (14)$$

$$N_i = 5.41 \times 10^{-9} \times \left(\frac{\Delta \epsilon_1}{2} \right)^{-5.77} \quad (15)$$

식(13)의 Dan Van식을 적용하여 차륜과 레일의 접촉부의 정수압 및 전단응력진폭을 각각 x , y 축을 기준으로 하여 차륜에 작용하는 응력상태를 Fig. 10과 같이 작성하였다. 접촉압력이 가장 많이 작용하는 위치

Fig. 8. SWT parameter - N of the railway wheel steel.

Fig. 9. ε - N of the railway wheel steel.

에 해당하는 위를 기준으로 y방향으로 각 노드에서의 정수압 $\sigma_h = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 과 전단응력을 Fig. 10에 나타내었다. 또한 $\tau_e = 265.0$ MPa, Dan Van의 재료상수 $\alpha_{DV} = 0.38$ [10]를 적용하여 접촉부에서의 정수압과 전단응력들을 도시하였다. Fig. 10을 통하여 차량의 구름시 정수압 및 전단응력들이 Dan Van식을 표시하는 그래프의 안쪽에 위치하여 결과적으로 차량이 구름 접촉시 차량의 모든 부위에서 피로균열이 발생하지 않는 것으로 판정되었다.

Fig. 10. The Dan Van diagram for the rolling contact of the wheel.

Table 2. Tensile and fatigue properties of the railway wheel steel[10]

UTS (MPa)	1027.7
YS (MPa)	626.7
Elongation (%)	40.4
b (fatigue strength exponent)	-0.072
σ'_f (fatigue strength coefficient)(MPa)	1319.5
ε'_f (fatigue ductility coefficient)	0.339
c (fatigue ductility exponent)	-0.5
σ_e (MPa)	422.5
τ_e (MPa)	265.0

4.3. 운행 차량에 대한 접촉피로수명 예측

본 연구에서는 구름접촉에 의한 차량의 균열발생 수명에 대한 평가를 위하여 실제 운행하고 있는 7호선 전동차 운행패턴에 대한 조사를 보고한 연구를 인용하였다. 이 연구에 따르면 도시철도 차량의 실제 영업주행거리 분석결과 전동차 1 편성당 1년간 차량회전 횟수는 약 39,339,725회로 보고되었다[13]. 따라서 차량당 적용하중을 85 kN으로 가정하여 차량과 레일의 구름 및 미끄럼에 의한 응력 해석 결과를 토대로 SWT 매개변수-수명 선도 및 변형률-수명 선도를 적용하여 수명을 평가하였다.

Table 3은 7호선 전동차 차량의 구름접촉에 의한 초기 피로손상(N_i) 수명을 산출하여 요약하였다. Table 3

Table 3. Predicted crack initiation lifetimes of the railway wheel due to rolling contact fatigue of the subway No.7 line ($\mu = 0.2$)

Method	$\Delta\epsilon/2$	$\Delta\gamma$	$\Delta\tau$ (MPa)	Ni (cycles)	Lifetime (yr)
ϵ -N	9.05×10^{-4}	-	-	1.96×10^9	49.9
SWT	-	3.49×10^{-3}	282.4	2.38×10^9	60.5

을 통하여 두 매개변수를 이용하여 예측한 결과 변형률-수명 방법과 SWT로 예측한 수명 모두 거의 무한 수명에 해당되었다. 그러나 차륜이 실제 운행 중에는 차륜 접선방향의 traction 하중, 차륜과 레일의 거칠기 등에 의한 충격하중, 제동시의 열응력 등이 추가되어 더욱 가혹할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 도시철도 전동차의 차륜의 구름접촉에 대하여 구조해석을 통하여 응력 및 변형률을 해석하고 해당 차륜에 대한 기계적 물성치를 적용하여 차륜의 피로 균열 발생 수명을 예측하고자 한다. 이를 통하여 도시 철도 전동차 차륜의 구름접촉에 의한 피로균열에서의 안전성을 검증하고자 한다. 이를 위하여 차륜 및 레일을 3D로 모델링하여 두 재료 변형거동을 비선형 등방성이며 유동성 경화로 가정하여 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차륜과 레일의 최대 접촉압력 (P_{max})은 축하중 85 kN에서 차륜과 레일의 경사도 및 탄소성변형 거동을 고려한 상태에서 마찰계수가 0 일 때 1111.4 MPa이며, Hertz이론에 의한 완전탄성상태에서의 결과와 비교하여 7.2% 정도 낮게 발생하였다.

2. 마찰계수를 0과 0.2일 경우 최대접촉압력분포의 경우 각각 1111.4 MPa, 1092.4 MPa로 마찰계수의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 마찰계수 0일 경우 차륜과 레일 접촉부의 von-Mises 응력은 656.9 MPa로 차륜재의 항복응력 626.7 MPa보다 약간 높게 발생하였다.

3. 차륜재 답면부의 구름접촉에 의한 피로균열 발생 수명예측을 위해 다축응력상태에서의 피로수명을 예측하는 Smith-Watson-Topper(SWT) 매개변수와 변형률-수명 식에 의해 얻어진 수명평가 식은 각각 $N_i = 7.35 \times 10^6 \times SWT^{-3.56}$, $N_i = 5.41 \times 10^9 \times \left(\frac{\Delta\epsilon}{2}\right)^{-5.77}$ 로 표현된다.

4. 차륜재 답면부의 구름접촉에 의한 피로균열 발생 수명을 평가하기 위하여 Smith-Watson-Topper(SWT) 식과 변형률-수명(ϵ -N)식을 적용하여 평가한 결과 두 식 모두 거의 무한수명에 해당되었고, Dan Van식을 이용하여 평가한 결과 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Uwe Zerbst, Katrin Madler, and Hartmut Hintze, "Fracture Mechanics in Railway Applications - an Overview," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 72, pp. 163-94, 2005.
2. 김청균, "레일-휠 접촉면 경사도에 따른 응력·변위량의 거동특성에 관한 연구", *한국철도학회*, 제7권, 제3호, pp. 186-192, 2004.
3. M.Sraml, J. Flasker, and I. Potrc, "Numerical Procedure for Predicting the Rolling Contact Fatigue Crack Initiation," *Int. J. Fatigue*, Vol. 25, pp. 585-95, 2003.
4. Y. Liu, L. Liu, and S. Mahadevan, "Analysis of Sub-surface Crack Propagation Under Rolling Contact Loading in Railroad Wheels using FEM," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 74 pp. 2659-674, 2007.
5. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, *Theory of elasticity*, 3rd Ed. McGraw-Hill Co. pp. 414-418, 1970.
6. Abaqus, ABAQUS User's Manual, version 6.4, 2003.
7. Y.B. Guo and M.E. Barkey, *Int. J. Fatigue*, Vol. 26, pp. 605-613, 2004.
8. M. Wiest, E. Kassa, W. Daves, J.C.O. Nielsen, and H. Ossberger, "Assessment of Methods for Calculating Contact Pressure in Wheel-rail/switcho Contact," *Wear*, Vol. 265, pp. 1439-1445, 2008.
9. J.A. Bannantine, J.J. Comer, and J.L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall, New Jersey, 1990.
10. 안중곤, 유인동, 권석진, 김호경, "도시철도 차량 차륜재의 다축 피로강도 평가," *한국안전학회 논문집* 인체중, 2012.
11. Y.Y. Jiang and H. Sehitoglu, "A Model for Rolling Contact Failure," *Wear*, Vol. 224, No. 1, pp. 38-49, 1999.
12. K. Dan Van, B. Griveau, and O. Message, "On a New Multiaxial Fatigue Limit Criterion: Theory and Application," in *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, European Group on Fracture, EGF Publication 3, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 479-496, 1989.
13. 이희섭, "지하철 7호선 차륜의 구름 및 미끄럼 접촉으로 인한 피로손상 예측 연구," 서울산업대학교 철도전문대학원 석사논문, 2009.