

잔류응력 변화를 고려한 철도차량 차륜의 접촉피로 수명평가

서정원[†] · 구병춘* · 최재봉** · 김영진**

(2004년 4월 21일 접수, 2004년 7월 7일 심사완료)

A Study on the Contact Fatigue Life Evaluation for Railway Wheels Considering Residual Stress Variation

Jung-Won Seo, Byeong-Choon Goo, Jae-Boong Choi and Young-Jin Kim

Key Words: Contact Fatigue(접촉피로), Railway Wheel(철도차량 차륜), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

Railway wheels and axles belong to the most critical components in railway vehicles. The service conditions of railway vehicles became more severe in recent years due to the increase of speed. Therefore, a more precise evaluation of wheelset life and safety has been requested. Wheel/rail contact fatigue and thermal cracks due to braking heat are two main mechanisms of the railway wheel failure. In this paper, an evaluation procedure for the contact fatigue life of railway wheel is proposed. One of the main sources of the contact zone failure is the residual stress. The residual stress on wheel is formed during the manufacturing process which includes a heat treatment, and then is changed by contact stress developed by wheel/rail contact and thermal stress induced by braking. Also, the cyclic stress history for fatigue analysis is determined by applying finite elements analysis for the moving contact load. The objective of this paper is to estimate fatigue life by considering residual stress due to heat treatment, braking and repeated contact load, respectively.

기호설명

σ' : 피로강도계수

- $2a$: 접촉면의 직경
- b : 피로강도지수
- C : 비열
- F_N : 접촉력
- P : 수직력
- V : 속도
- β : 열 분담률
- μ : 마찰계수
- ρ : 밀도

1. 서론

최근 철도차량의 고속화에 따라 철도차량의 중요부품이라 할 수 있는 차륜과 차축의 사용조건은 점점 가혹해지고 있다. 철도차량의 경우 한번 사고가 발생하면 대단히 큰 인명피해가 발생할 수 있기 때문에 이의 방지를 위하여 신뢰성평가가 필수적이라 할 수 있다. 차륜과 레일의 접촉에 의한 손상 중 레일의 헤드 체크잉(head checking) 및 스콧(squat)에 대하여는 많은 연구가 진행되어 왔다. 차륜에 대하여는 마모와 관련된 연구가 수행된바 있으며 최근에 접촉면 손상에 대한 연구가 진행중이다.⁽¹⁻³⁾

차륜에 발생하는 손상요인은 차륜/레일의 접촉응력에 의한 박리(Spalling, Shelling), 제동열에 의

[†] 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원

E-mail : jwseo@krii.re.kr

TEL : (031)460-5210 FAX : (031)460-5279

* 회원, 한국철도기술연구원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

한 열크랙 등이 있다. 차륜 접촉면의 잔류응력은 운행시 제동열에 의해 그 분포가 변화한다고 알려져 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ G. Donzella⁽⁷⁾는 반복적인 제동열에 의한 열응력 및 잔류응력을 평가하고 이로부터 열피로수명을 평가하였다. R. Lunden⁽⁸⁾은 축대칭 모델을 사용하여 제동시 열하중이 차륜의 접촉피로수명에 미치는 영향을 평가하였다. 이 모델은 제동시의 잔류응력은 고려할 수 있으나 제조시 잔류응력 및 차륜/레일의 마찰에 의한 접선력은 고려한 바 없다. A. Ekberg⁽⁹⁾ 등은 차륜에 대한 접촉수명평가를 위한 고주기 피로 모델을 제시하였으나 차륜 접촉면의 깊이 방향에 따른 잔류응력 변화를 고려하지 않았다. M. Sraml⁽¹⁰⁾ 등은 일반적인 부품에 대하여 유한요소 해석을 이용하여 사이클릭 하중을 통한 접촉피로수명평가 모델을 제시하였지만 잔류응력의 영향을 고려하지 않고 평가하였다. 지금까지의 차륜에 대한 수명평가는 열균열에 대한 평가와 차륜/레일의 접촉피로수명 평가로 구분되며 접촉피로수명평가시 제조시부터 제동열에 의한 잔류응력의 변화는 고려된 바 없다.

본 논문에서는 차륜의 제조시부터 제동열의 영향까지 모든 잔류응력의 변화를 고려하여 수명을 평가하는 방법을 제시하고 이를 바탕으로 잔류응력이 수명에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 제조시 열처리에 의한 잔류응력

철도차량 차륜은 차륜/레일 접촉면에서의 마모를 줄이기 위해 표면에서의 경도를 높이며 이를 위해 열처리를 실시한다. 이러한 열처리 과정에서 접촉면에 압축잔류응력이 발생하여 접촉면 손상을 억제하는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 제조시 열처리에 의해 발생하는 잔류응력을 유한요소 해석과 실험을 통하여 평가하였다.

2.1 열처리조건

철도차량 차륜의 제조과정은 Fig. 1에 도시한 바와 같이, 압연 후 공냉을 실시하고 차륜접촉면에 수냉을 실시한 후 다시 뜨임 처리의 순서로 진행된다.

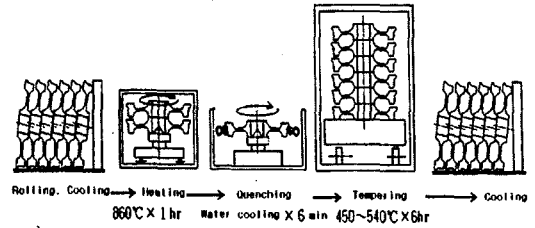


Fig. 1 Manufacturing process of wheel⁽¹¹⁾

Table 1 Material properties for F.E. analysis

Temperature (°C)	E (GPa)	Poisson's ratio (ν)	Coefficient of thermal expansion (×10 ⁻⁵ /°C)	Yield strength (MPa)
24	213	0.295	1.0	490
230	201	0.307	1.15	424
358	193	0.314	1.24	366
452	172	0.320	1.30	291
567	102	0.326	1.37	132
704	50	0.334	1.30	39
900	43	0.345	1.40	11

2.2 해석모델 및 물성치

해석대상으로는 현재 국내에서 사용하는 객화차용(SSW1) 차륜을 선정하였으며, 해석모델 및 하중의 대칭성을 고려하여 축대칭 모델을 사용하였다. Fig. 2에는 해석에 사용된 모델을 나타내었다.

본 연구에서는 열전달 해석을 수행한 후 이를 바탕으로 열응력 해석을 수행하였다. 열처리 과정은 대류조건을 사용하여 가열, 냉각, 뜨임, 냉각 순으로 적용하였으며 접촉면의 시간에 따른 온도 변화는 Fig. 3과 같다. 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같으며 탄소성해석 조건으로는 완전소성조건을 적용하였다.

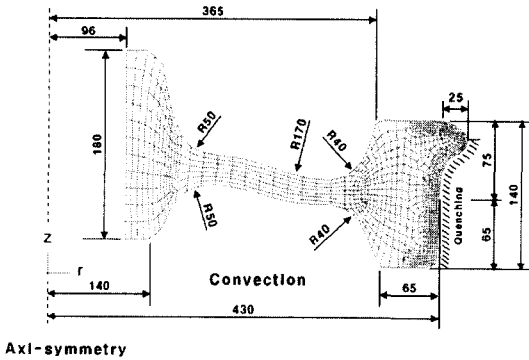


Fig. 2 Analysis model

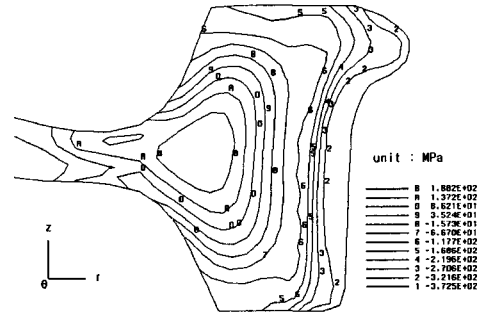


Fig. 4 F.E. Analysis result($\sigma_{\theta\theta}$)

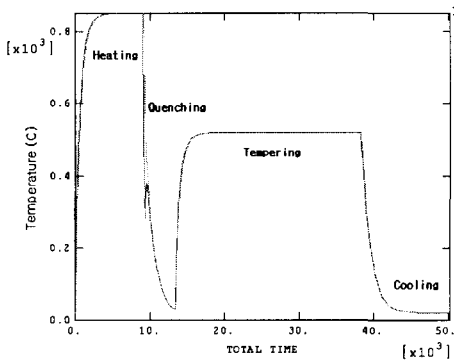


Fig. 3 Temperature change during heat treatment analysis

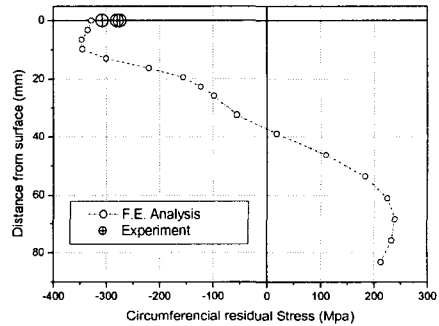


Fig. 5 Comparison of residual stresses between by analysis and experiment($\sigma_{\theta\theta}$)

2.3 해석결과 및 실험 결과

해석결과와 검증의 위하여 접촉표면의 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력 측정에는 작은 구멍을 내어 잔류응력을 국부적으로 이완시키는 방법인 천공법(hole drilling method)^(12,13)을 사용하였으며 3개 지점에서 측정을 수행하였다.

Fig. 4는 열응력 해석결과로써 차륜 접촉면에서 원주방향 압축잔류응력이 발생하였다. Fig. 5는 차륜 접촉면 중앙에서의 깊이 방향에 따른 잔류응력의 변화를 나타낸 것이다. 열처리 과정시에 원주방향 잔류응력은 표면에서 -330MPa로 나타났으며 내부로 가까이 갈수록 인장잔류응력으로 변화하는 경향을 나타내었다. 이때 인장에서 압축으로 변화하는 위치의 깊이는 38mm로 나타났다. 잔류응력 측정결과는 표면에서 -280~ -310 MPa로 나타나 해석결과와 유사하였다.

3. 제동시 잔류응력

마찰식 제동장치를 사용할 경우에는 제동열에 의하여 열응력이 발생하고 이로부터 제조시의 잔류응력이 변화한다. 본 연구에서는 이를 고려하여 제동시 잔류응력의 변화를 평가하였다.

3.1 제동 다이내모 실험

제동조건에 따른 잔류응력의 변화를 파악하는 해석을 위해서는 해석상의 입력조건인 열유입량이 필요하다. 본 연구에서는 제동다이내모 실험을 통하여 해석 입력조건을 설정하고 해석결과와의 비교검증을 위해 제동시 온도를 측정하였다.

Fig. 6은 제동시험시 측정된 속도, 수직력 및 온도 측정결과로서 해당조건은 비상제동 조건이다. 그림에서와 같이 속도는 제동 시점에서 선형

적으로 감소하고 수직력은 압력이 가해지는 시간인 3.5초 후에 일정한 값으로 나타났다. 온도는 표면 밑 5mm에서 측정된 결과로서 최고 240°C까지 도달하였다.

Fig. 7은 마찰계수와 측정된 값으로부터 계산한 열유입량을 나타내고 있다. 마찰계수 값은 속도에 따라 변화하며 평균 0.2이다. 제동시 발생한 열량은 전부 차륜으로 유입되는 것이 아니고 일부는 마찰재로 유입된다. 차륜으로 유입되는 열량의 비와 단위 면적당 열유입량은 다음 식들로 나타낼 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{A_2 \sqrt{(K_2 \rho_2 C_2)}}{A_1 \sqrt{(K_1 \rho_1 C_1)}}\right) \quad (1)$$

$$\text{Heat Flux (w/m}^2\text{)} = \frac{\beta \mu P V}{A} \quad (2)$$

여기서, μ : 마찰계수, P: 수직력, V: 속도
 A: 접촉면적, K: 열전달계수, ρ : 밀도
 C: 비열, 첨자 1, 2: 차륜, 마찰재

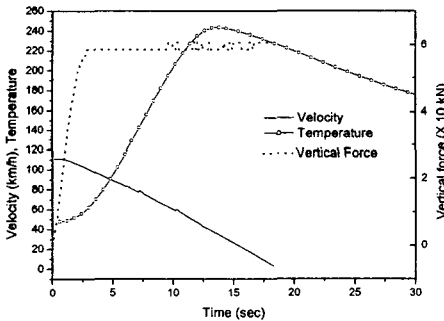


Fig. 6 Variations of velocity, force and temperature from the test

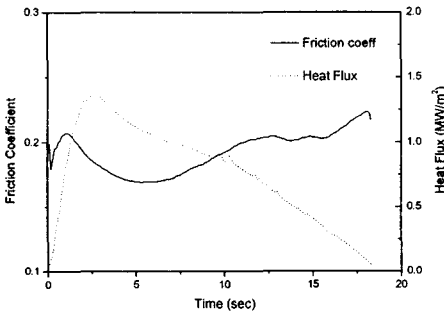


Fig. 7 Variation of friction coefficient from the test and corresponding heat flux

3.2 잔류응력 해석

제동 다이노모 실험결과로부터 계산한 시간에 따른 열유입량을 입력조건으로 열전달 및 열응력 해석을 수행하였으며, 초기조건으로는 제조조건을 고려하여 계산한 잔류응력을 부여하였다.

Fig. 8은 제동 후의 원주방향 잔류응력으로 제동열이 유입되는 부분에서 인장잔류응력이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 9는 모델을 검증하기 위하여 제동시간에 따른 온도변화를 실험과 비교한 것으로 표면 밑 5mm 부근에서 두 결과가 잘 일치하였다. 차륜 접촉면 표면에서의 온도는 이보다 높은 285°C까지 도달하는 것으로 해석결과 나타났다.

Fig. 10은 제동 전후의 잔류응력의 변화를 차륜 접촉면에서 깊이방향으로 나타낸 것으로, 표면에서의 잔류응력은 제동 후 인장잔류응력으로 변화하는 것으로 나타났다. 변화되는 깊이는 15mm 부근이며, 그 이후 깊이에서는 전반적인 경향과 크기가 유사하였다.

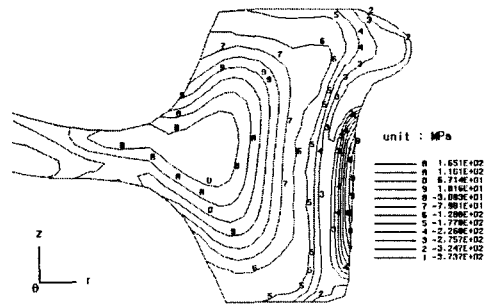


Fig. 8 Residual stress distribution after braking

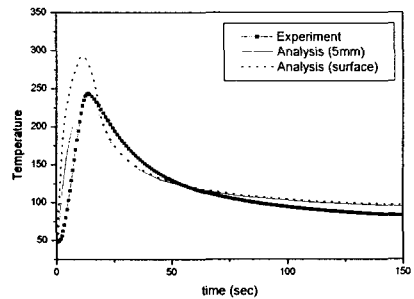


Fig. 9 Comparison of temperature between analysis and experiment

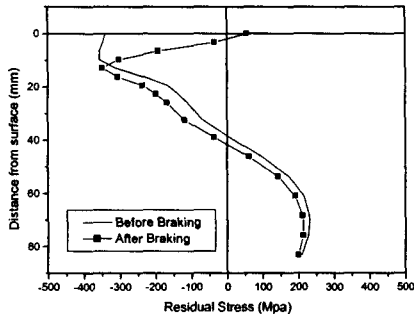


Fig. 10 Residual stress change due to braking

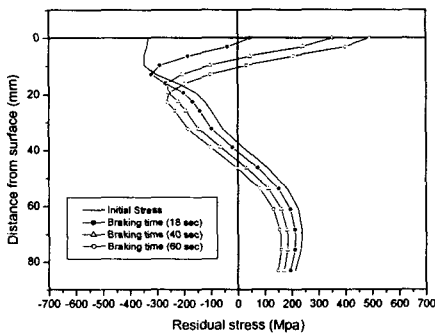


Fig. 11 Residual stress variation according to braking time

3.3 제동시간의 변화에 따른 잔류응력

제동조건에 따른 차륜 접촉면의 잔류응력의 변화를 살펴보기 위하여 초기속도를 110 km/h 로 일정하게 하고 제동시간을 18, 40 및 60 초로 하여 유한요소해석을 수행한 후 비교하였다.

Fig. 11은 해석조건에 따른 잔류응력으로 제동시간이 길어짐에 따라 잔류응력이 압축에서 인장으로 보다 크게 변화하는 것으로 나타났다. 또한 잔류응력이 압축에서 인장방향으로 천이하는 변곡점의 위치가 제동시간이 길어짐에 따라 표면에서 점점 더 멀어지는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 제동시 발생하는 최고온도에 따른 잔류응력의 변화이다. 최고온도를 기준으로 150℃부근까지는 잔류응력의 변화가 발생하지 않았고, 그 이후에서는 선형적으로 변화하는 것으로 나타났다. 제동전의 압축잔류응력이 약 -330MPa인 경우에 최고 온도가 약 300℃ 다다르면 압축잔류응력이 인장잔류응력으로 바뀌는 것으로 나타났다.

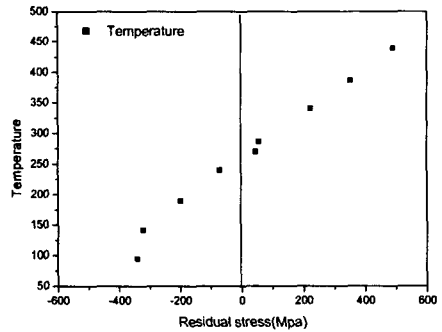


Fig. 12 Residual stress variation according to maximum temperature

4. 피로수명평가

4.1 피로수명평가 절차

피로수명평가를 위해서는 차륜에 발생하는 하중이력을 파악해야 한다. 차륜과 레일의 탄성 접촉에 의한 발생 응력은 이론적으로 잘 알려져 있지만 차륜의 회전에 의한 하중 사이클을 이론적으로 평가하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 차륜의 회전에 의한 사이클 하중을 유한요소해석을 이용하여 평가하였다.

하중이력을 계산하는데 있어서 평가 절차는 차륜이 레일에 접촉하여 발생하는 압력은 Hertzian 이론에 따라서 다음 식과 같이 이상화 하였다.⁽¹⁵⁾

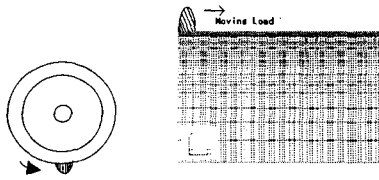
$$p(x) = \frac{2F_N}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \tag{3}$$

$$a = \sqrt{\frac{4F_N R^*}{\pi E^*}} \cdot \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{4}$$

- 여기서 p(x) : 수직력에 의해 발생하는 압력분포,
- F_N : 단위 길이 당 수직접촉력,
- 2a : 접촉면적,
- R* : 등가 반경,
- R_{1,2} : 접촉면의 반경

Fig. 13(a)는 차륜과 레일의 접촉 상태를 나타낸 것으로 이를 Fig. 13(b)와 같은 유한요소모델로 이상화하였다.

차륜이 레일을 구르는 운동은 접촉하중의 움직임으로 모사하였고 이때 각각의 부위에서 발생하는



(a) Contact condition (b) F.E. model
Fig. 13 Model of rolling contact for wheel/rail

Table 2 Material properties for fatigue analysis⁽¹⁷⁾

E (GPa)	ν	G (GPa)	σ_f' (MPa)	ϵ_f' (%)	b	c	τ_f' (MPa)	γ_f' (%)
209	0.3	80,385	1,500	44.80	-0.101	-0.58	667	83.8

연성계수이고 b, c는 피로강도 및 피로연성지수이다. 피로수명평가에 사용된 물성치는 Table 2에 나타내었다.

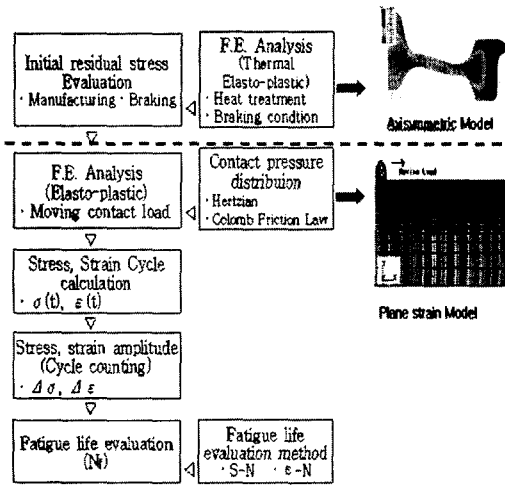


Fig. 14 Fatigue life evaluation procedure

응력 이력을 구하여 수명평가에 적용하였다. 이때의 응력 이력은 접촉압력의 움직임에 따른 응력변화를 바탕으로 구하였으며 접촉압력이 첫부분에서 마지막 부분까지 이동하였을 경우를 차륜이 한번 회전한 것으로 설정하였다. Fig. 14는 본 연구에 적용한 수명평가 절차를 나타내고 있다.

4.2 피로수명평가 방법

결정된 하중이력 사이클을 바탕으로 각각의 지점에서 피로수명해석을 수행하였다. 접촉피로의 경우 접촉하중에 의해 표면 내부에 발생하는 전단변형률이 균열발생에 지배적인 역할을 하기 때문에 Coffin-Manson 식을 최대 전단전폭으로 표현한 다음 식을 이용하여 평가하였다.⁽¹⁶⁾

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^b + \gamma_f' (2N_f)^c \quad (5)$$

여기서 τ_f' , γ_f' 는 전단피로강도 및 전단피로

4.3 수명평가 결과

본 논문에서는 초기잔류응력이 없는 경우, 제조시 잔류응력이 있는 경우 그리고 제동열에 의해 표면 부근의 압축잔류응력이 인장잔류응력으로 바뀌는 3가지 모델을 사용하여 피로수명을 평가하였다. 이때 제동열에 의해 인장잔류응력으로 바뀐 경우는 Fig. 11에서 인장잔류응력이 최대가 된 경우이다. 수명평가 시 하중이력은 접촉하중이 움직임에 따른 분석결과를 사용하였다.

Fig. 15는 잔류응력이 없는 경우의 하중이력으로써 차륜의 3회 회전 시 표면으로부터 깊이애 따른 변형률의 변화이다. 초기의 잔류응력이 없는 상태에서는 1회전 후에 소성변형이 발생하여 표면으로부터 3mm 부근에서는 잔류 스트레인이 발생하고 있다.

Fig. 16은 잔류응력이 없는 경우 첫번째 하중통과 후 잔류응력분포를 나타낸 것으로 전반적으로 압축잔류응력이 발생하였다. 최대값은 3mm 부근에서 발생하였으며 그 크기는 235MPa로 항복응력을 넘어서 소성변형이 발생한 것으로 예측되었다.

Fig. 17은 제조시 잔류응력이 있을 경우의 차륜의 회전에 따른 변형률 이력을 나타낸 것이며 Fig. 18은 제동시의 잔류응력을 고려한 경우의 변형률 이력을 나타낸 것이다. 그림과 같이 제조시의 경우에는 차륜의 1회전 이후에 잔류 스트레인이 크게 발생하지 않고 있지만 제동열에 의한 경우에는 1회전 이후에 변형률 이력이 크게 변화함을 알 수 있다.

Fig. 19는 수명 평가한 결과로써 수명은 잔류응력이 없는 경우를 기준하여 표시하였다. 수명

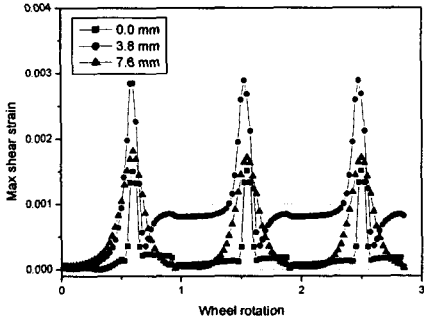


Fig. 15 Strain history according to rolling contact of wheel

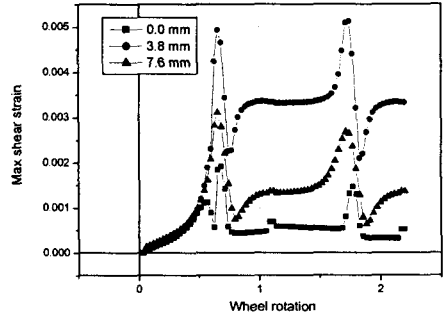


Fig. 18 Strain history considering residual stress due to braking

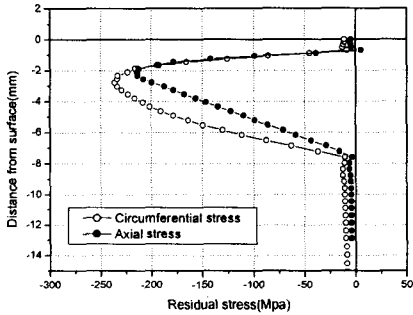


Fig. 16 Residual stress distribution after 1st rolling

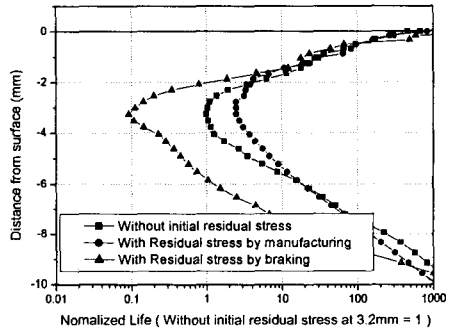


Fig. 19 Fatigue life results using time history

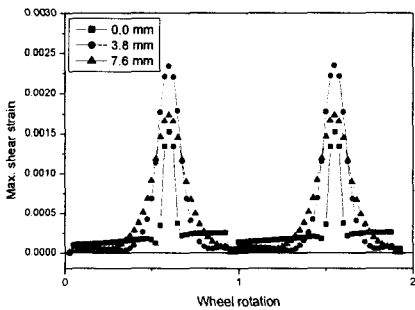


Fig. 17 Strain history considering residual stress due to manufacturing process

평가 결과 잔류응력이 없는 경우에 비하여 제조 시 압축잔류응력이 있을 경우에는 수명이 2.48배 증가하였고, 인장잔류응력으로 변화했을 경우에는 10.9배 수명이 감소하였다.

균열발생위치는 표면으로부터 3.26mm에서 발생하였다. 차륜의 일반적인 균열발생위치는 표면

으로부터 약 3 ~ 5 mm 부근에서 발생하는 것으로 비파괴 검사를 통하여 알려져 있으며 이는 수명평가 결과와 일치하였다.⁽¹⁸⁾

5. 결론

철도차량의 차륜 접촉면의 피로수명을 평가하기 위하여 제조 시부터의 잔류응력 및 접촉하중을 고려하여 수명을 평가하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 철도차량의 차륜의 접촉피로수명평가 시 잔류응력의 변화를 고려할 수 있는 수명평가 절차를 제시하였다.

(2) 철도차량 차륜은 제동열에 의하여 잔류응력이 변화하며 제동전의 압축잔류응력이 -330MPa 인 경우에 최고 온도가 약 300℃ 다다르면 압축 잔류응력이 인장잔류응력으로 바뀌는 것으로 나

타났다.

(3) 차륜의 접촉피로수명에 대한 잔류응력의 영향은 잔류응력이 없는 경우에 비하여 제조시 압축잔류응력이 있을 경우에는 수명이 2.48배 증가하였고, 인장잔류응력으로 변화했을 경우에는 10.9배 수명이 감소하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

- (1) Cannon, D. F. and Pradier, H., 1996, "Rail Rolling Contact Fatigue Research by the European Rail Research Insititue," *Wear*, 191, pp. 1~13.
- (2) Bijak-Aochowski, M., 1997, "Residual Stress in Some Elasto-Plastic Problems of Rolling Contact with Friction," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 39, pp. 15~32.
- (3) Kulkarni, S. M., 1991, "Elasto-Plastic FE Analysis of Repeated Three Dimensional, Elliptical Rolling Contact with Rail Wheel Properties," *Transactions of the ASME*, Vol. 113, pp. 434~441.
- (4) Gordon, J. and Perlman, A., 1998, "Estimation of Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels Following Manufacture," ASME IMECE RTD.
- (5) Kim, K. J. and Choi, K. J., 1993, "A Study on Countermeasure of Damage of Railway Wheel," *Railway Technology Report*, Vol. 27, pp. 201~233.
- (6) Seo, J. W., Suk, C. S. and Kim, Y. J., 2002, "Change of Residual Stress of Railway Wheel by Brake Condition," *Proceedings of the KSME Material and Fracture part*, pp. 176~182.
- (7) Donzella, G. and Scepi, M., 1998, "The Effect of Block Braking on the Resdual Stress State of a Solid Railway Wheel," *IMechE*, pp. 145~158.
- (8) Lundin, R., 1991, "Contact Region Fatigue of Railway Wheels Under Combined Mechanical Rolling Pressure and Thermal Brake Loading," *wear* 144, pp. 57~70.
- (9) Ekberg, A. and Bjarnehed, H., 1995, "A Fatigue Life Model for General Rolling Contact with Application to Wheel/Rail Damage," *Fatigue Fract. Eneng Mater. Struct.* Vol. 18, pp. 1189~1199.
- (10) Sraml, M. and Flasker, J., 2003, "Numerical Procedure for Predicting the Rolling Contact Fatigue Crack Initiation," *Int. Journal of Fatigue* 25, pp. 585~595.
- (11) Noda, T., 2002, "Safety of Wheels and Axles for Railway Vehicles and Engineering Ethics," *Forum* Vol. 7 No. 7, pp. 9~16.
- (12) Joo, J. W. and Park, C. K., 1998, "Determination of Non-Uniform Residual Stress by the Hole Drilling Method," *Transactons of the KSME A* Vol. 22, No. 2, pp. 268~277.
- (13) Kim, C., Suk, C. S. and Yang, W. H., 2000, "Influence of the Hole Eccentricity in Residual Stresses Measurement by the Hole-drilling Method," *Transactons of the KSME A*, Vol. 24, No. 8, pp. 2059~2064.
- (14) Idemura, K., 1997, "Brake Technology of Railway Vehicle," *Research of Machine*, Vol. 49, pp. 49~68.
- (15) Johnson, K.L., 1985, "Contact Mechanics," Cambridge University Press, pp. 99~104.
- (16) Ringsberg, J.W., 2000, "Prediction of Fatigue Crack Initiation for Rolling Contact Fatigue," *Int. Journal of Fatigue* 22, pp. 205~215.
- (17) Moyar, G., 1991, "An Analysis of the Thermal Contributions to Railway Wheel Shelling," *Wear*, 144, pp. 117~138.
- (18) Mutton, P., 1991, "Rolling Contact Fatigue in Railway Wheels Under High Axle Loads," *Wear*, 144, pp. 193~152.