

White etching layer의 유한요소해석 및 접촉피로수명평가

F.E. analysis and evaluation of contact fatigue life of white etching layer

*#서정원¹, 권성태², 이동형¹, 유원희³

*J.W.Seo(jwseo@krii.re.kr)¹, S.T.Kwon², D.H.Lee¹, Y.H.Yoo³

¹ 한국철도기술연구원 차륜제도연구실, ² 한국철도기술연구원 시험인증센터, ³ 한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : White etching layer(WEL), contact fatigue

1. 서론

레일 표면에서 발생하는 접촉피로손상인 Squat, Head check 등은 중요한 문제로 대두되고 있다^(1,2,3). Squats은 직선구간 및 반경이 큰 곡선구간에서 발생한다고 알려져 있으며 Head checks의 경우에는 곡선부의 High rail에서 반복적인 Plastic strain에 의해 주로 발생한다. Squats은 표면에서 형성된 WEL에서 발생하는 하는 것이 하나의 원인이라고 보고되고 있으며, 차량의 견인 및 제동 시 차륜이 레일 위를 활주하면서 발생하는 마찰열에 의해서 형성된다고 알려져 있다. 일본의 경우에 WEL로부터 발생하는 균열은 두 가지 형태로 발생하고 있다. 첫 번째는 WEL의 끝단(백색층과 모재의 경계지역)에 발생하고, 두 번째는 WEL의 중간에서 발생한다. WEL의 끝단에 발생하는 균열은 모재까지 균열이 진전하는 경우도 있으며, 중앙에서 발생하는 균열은 WEL안에서 머무르고 있다^(4,5,6).

이러한 손상이 발생하면 큰 충격하중이 발생하여 레일 및 차량에 안전에 영향을 주며, 적절한 시기에 제거하지 않으면 레일의 파단시켜 대형 사고를 유발한다. 현재의 레일 손상에 대한 유지보수 방법으로는 손상된 부위를 그라인딩하는 것으로 유지보수 비용을 증가시킨다. Squats의 발생을 방지하고 저감시키는 대책을 수립하기 위해서는 발생 및 진전 메카니즘의 이해가 필요하다. 본 논문에서는 구름접촉에 따른 유한요소해석 및 피로수명평가를 통하여 WEL의 거동을 평가하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델 및 하중조건

해석모델은 Fig. 1과 같이 WEL이 포함된 레일은 Plain strain 요소로 모델링하였고 차륜의 경우에는 강체(Rigid Body)로 모델링하였다. 레일 모델에 사용된 요소갯수(Element)는 32,375개이며 절점갯수(Node)는 35,669개이다. WEL은 탄성체로 모델링하였고 그 외의 부분은 탄소성으로 모델링 하였으며 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다^(7,8). 탄소성 해석에서 항복조건은 Von-mises, 유동성경화법칙(Kinematic Hardening Rule)을 사용하였다. 해석방법은 차륜에 하중을 부가하여 레일 위를 반복적으로 회전하도록 하였으며 ABAQUS Explicit를 이용하여 해석을 수행하였다.

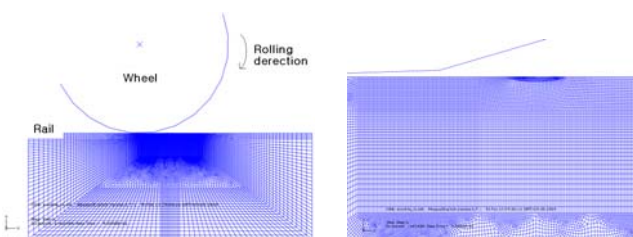


Fig. 1 F.E Model

Table 1 Mechanical properties

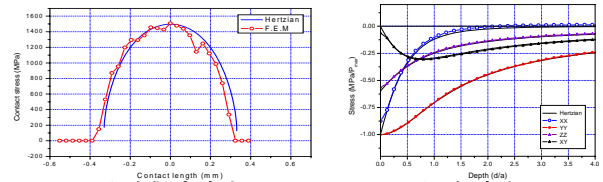
Model	Young's Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Density (kg/m ³)	Poisson' ratio
WEL	206	Elastic Material	7850	0.3
Base	206	507	7850	0.3

2.2 해석모델의 검증

해석모델의 검증을 위하여 탄성해석을 수행하여 Hertz의 이론식과 비교하였다. 탄성접촉시 접촉압력은 다음의 식으로 표현되며 Fig. 2(a)는 이론식과 해석에 따른 압력 분포를 비교한 것이다. 차륜이 구름에 따라서 이론식과 정확히 일치하지는 않지만 전반적으로 유사한 값을 보이고 있다. Fig. 2(b)는 접촉 내부의 응력분포를 이론식과 해석 값을 비교한 것이다. x 방향과 y 방향의 응력은 표면에서 최대가 발생하고 있고 전단응력과 Von mises 응력은 표면 밑에서 최대 값이 발생하고 있으며 이론식과 잘 일치함을 보여주고 있다. 접촉면에 발생하는 접촉압력 및 내부의 응력 분포는 다음의 식으로 표현된다.

$$P(x) = \frac{2P}{\pi a^2} (a^2 - x^2)^{(1/2)} \quad (1)$$

$$\sigma_x = -\frac{P_0}{a} [(a^2 + 2y^2)(a^2 + y^2)^{-1/2} - 2y] \quad (2)$$



a) 접촉압력분포 b) 응력분포

Fig. 2 탄성 해석 결과

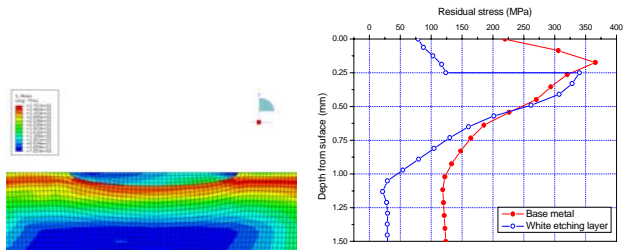
2.2 구름접촉에 따른 WEL의 응력분포

구름접촉의 경우에는 첫 번째 구름접촉 후에는 접촉응력이 탄성한도를 넘어서면 소성변형이 발생하여 잔류응력이 생성된다. 두 번째 하중이 통과시에는 첫 번째 하중에서 생성된 잔류응력과 접촉응력을 받게된다.

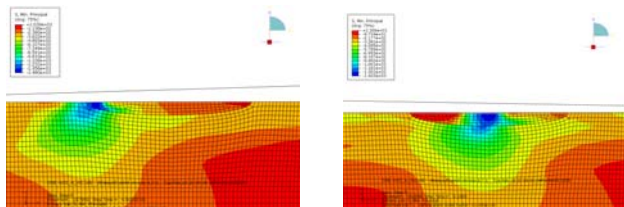
Fig. 3 (a)는 첫 번째 하중 통과 후에 발생된 잔류응력 분포를 나타내고 있다. WEL이 없는 부분에서의 잔류응력은 표면 밑에서 최대가 발생하고 있지만, WEL이 있는 부위에서는 WEL 바로 밑에서 최대 잔류응력이 발생하고 있다. 소성변형을 분포는 잔류응력 분포의 경향이 유사하지만 최대가 발생한 부위는 하중 부가가 시작되는 WEL 끝단에서 발생하고 있고 WEL의 경우에는 탄성체 모델링 하였기 때문에 소성 변형이 발생하지 않고 있다. Fig.3(b)는 모재 부위와 WEL의 중간 부위에서 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 모재 부위에서 최대 잔류응력은 접촉표면 밑에서 370 MPa이 발생하고 있고 WEL 부위에서 경계면에서 330 MPa이 발생하였다.

Fig. 4(a) - (c)는 세번째 구름접촉에 따른 응력의 변화를 나타내고 있다. WEL의 통과시에 최대응력은 표면에서 발생하고 있지만 WEL의 탄성체로 모델이 되었기 때문에 WEL 과의 경계면에 서도 큰 응력이 발생하고 있다.

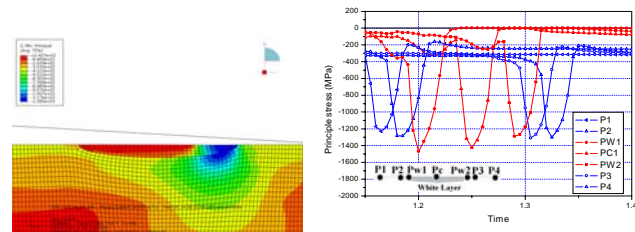
Fig. 4(d)는 구름접촉에 따른 각각의 위치에서의 응력 이력을 나타내고 있다. WEL의 하중 부가가 시작되는 첫 번째 끝단(Pw1)에서의 하중이력이 가장 크게 발생하고 있고 중앙 통과 시에도 다른 부위에 비하여 큰 응력이 발생하고 있다. WEL의 하중이 끝나는 부위인 두 번째 끝단부(Pw2)에서의 하중이력은 모재부분과 유사하게 발생하고 있다. 이로부터 균열은 Pw1에서 가장 먼저 발생할 것으로 예측된다.



a) 잔류응력분포 b) WEL 중앙에서의 잔류응력
Fig. 3 첫 번째 구름접촉후 잔류응력분포



a) WEL 시작부분 b) WEL 중앙부분



c) WEL 끝단부분 d) 위치에 따른 응력이력
Fig. 4 구름접촉에 따른 응력분포변화

3. 피로강도평가

3.1 피로수명 평가방법 및 물성치

재료가 소성변형이 발생하면 수명평가 방법은 일반적으로 많이 사용되는 $\epsilon-N$ 방법을 사용하며, 전단변형률이 파손의 지배적인 경우에는 Coffin-Manson식을 최대 전단진폭으로 표현된 식을 이용한다. 일반적으로 접촉피로의 경우는 전단변형률이 파손의 지배적이기 때문에 다음의 식을 이용하여 평가하였다.

$$\frac{\Delta\gamma_{max}}{2}(1+k\frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_y}) = \frac{\tau_f'}{G}(2N_f)^b + \gamma_f'(2N_f)^c \quad (3)$$

WEL의 피로수명을 평가하기 위하여는 이에 대한 피로물성치가 필요하다. 그러나 이에 대한 물성치를 얻기가 어려우므로 모재부의 피로물성치를 이용하여 평가하였으며 Table 2와 같다.

Table 2 Material properties for fatigue analysis

G (GPa)	σ_y' (MPa)	ϵ_f' (%)	b	c	τ_f' (MPa)	γ_f' (%)
80,385	1,288	25.2	-0.103	-0.46	744	43.6

3.2 수명평가 결과

Fig. 5는 균열 발생 각도를 평가하기 위하여 각도에 따른 피로 파라메타 변화를 나타내고 있다. WEL에서 하중이

부가되기 시작되는 끝단(PW1)과 중앙부(Pc)에서는 균열이 86도, 반대쪽(PW2)에서는 93도에서 균열이 발생하는 것으로 예측되고 있다. PW1의 경우에는 WEL 경계면에서 1.3 mm 떨어진 위치에서 평가하였기 때문에 시험결과와 일치하지 않고 있고, WEL의 중앙부 (Pc)에서는 시험 결과와 유사하다. Fig. 6은 WEL의 3가지 위치에서의 수명평가 결과를 나타내고 있다. 수명이 가장 짧은 부위는 WEL에서 하중이 부가되기 시작되는 끝단(PW1)이고 두 번째로 수명이 짧은 부위가 중앙부(Pc)이다. WEL의 반대쪽 끝단부(Pw2)의 경우에는 Pw1 보다 약 17배가 수명이 길게 평가되었고, 중앙부 보다는 3배 정도 수명이 길게 평가되었다.

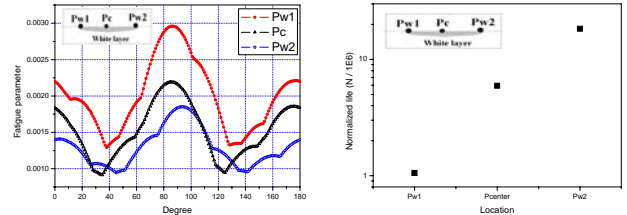


Fig. 5 균열발생각도 Fig. 6 피로강도 평가결과

4. 결론

유한요소법을 이용하여 WEL의 접촉응력 해석 및 피로강도를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. WEL이 없는 부분에서의 잔류응력은 표면에서 최대가 발생하고 있지만, WEL이 있는 부위에서는 WEL 바로 밑에서 최대 잔류응력이 발생하고 있다. 모재 부위에서 최대 잔류응력은 접촉표면 밑에서 370 MPa이 발생하고 있고 WEL 부위에서 경계면에서 330 MPa 이 발생하였다.
2. WEL의 하중 부가가 시작되는 첫 번째 끝단 (Pw1)에서의 하중이력이 가장 크게 발생하고 있고 중앙 통과 시에도 다른 부위에 비하여 큰 응력이 발생하고 있다.
3. 수명이 가장 짧은 부위는 WEL에서 하중이 부가되기 시작되는 끝단(PW1)이고 WEL의 반대쪽 끝단부(Pw2)의 경우에는 Pw1 보다 약 17배가 수명이 길게 평가되었고, 중앙부 보다는 3배 정도 수명이 길게 평가되었다.

후기

본 논문은 철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Kondo, K. Yoroizaka, Y. Sato:Wear,1996,“Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling” Wear 191,p199-203
- 2.UIC leaflet 712, 2002,“Rail defects”
- 3 D. F. Cannon, H. Pradier,1996,“Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute”, Wear 191, pp. 1 - 13.
4. Y. JIN, M. ISHIDA,2005,“Analysis of white etching layer generated on rail surface”, RTRI REPORT Vol. 19,p.17-22
5. G.Baumann, H.J.Fecht,S.Liebelt,1991,“Formation of white-etching layers on rail treads”:Wear 191(1996),p.133-140
6. R.I.Carroll, J.H.Beynon, 2007,“Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1: Crack morphology” Wear 262,p1253-1266
7. A.W.Warren, Y.B.Guo,2005,“Numerical investigation on the effect of machining-induced white layer”,Trib. trans.48, pp 436-441
8. T.Kato, A.Sugeta,T.Makita,2007,“Evaluation of rolling contact fatigue properties of white layer in railway wheel steel”J. of Society of material Science, Vol. 56, pp.1050 - 1155