White etching layer의 두께변화에 따른 접촉피로수명평가

Contact fatigue analysis of white etching layer according to thickness variation

*#서정원[1], 권성태[2], 이동형[1], 유원희[3]

*#J.W.Seo(jwseo@krri.re.kr)[1], S.T.Kwon[2], D.H.Lee[1], Y.H.Yoo[3]

[1] 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실, [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]. 레일에서 발생하는 손상중의 하나인 Squats은 표면에서 형성된 WEL에서 발생하는 하는 것이 하나의 원인이라고 보고되고 있다. 이러한 WEL은 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 머무루고 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.레일 손상 예방을 위한 한가지 방법으로는 WEL의 두께를 주시하여, 일정두께가 도달하였을 경우에는 예방삭정을 하여는 방법이 있다. 이와 관련하여 일본에서는 레일 두부의 반발계수를 이용하여 WEL의 두께를 측정하는 방법이 검토되고 있다. 예방삭정을 위해서는 WEL의 두께가 어느정도 되었을 경우에는 레일손상 혹은 균열 발생의 가능이 높아지는지에 대한 정략적인 평가가 중요하다. 본 논문에서는 유한요소해석 및 접촉피로수명평가를 통하여 WEL의 두께변화가 수명에 미치는 영향을 평가하였다.

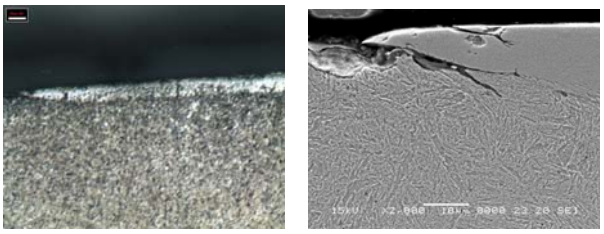


Fig. 1 레일에서 발생하는 WEL

2. 유한요소해석

2.1 유한요소해석모델 및조건

해석모델은 Fig. 2와 같이 WEL이 포함된 레일은 Plain strain 요소로 모델링하였고 차륜의 경우에는 강체(Rigid Body)로 모델링하였다. WEL의 해석모델은 두 가지 모델을 이용하여 평가하였다. 실제 발생한 WEL의 형상으로 모델을 할 경우 WEL의 두께가 작아지면 모델을 생성하기 어렵고 해석시간 역시 오래 걸리므로 WEL의 두께를 변화시켜 가면서 해석을 수행하기 위하여는 단순화된 모델이 필요하다. Fig.3은 실제 발생한 WEL을 모델한 경우와 이를 단순화 모델의 경우이다.

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 레일위를 반복적으로 회전하도록 하였으며 ABAQUS Explicit를 이용하여 해석을 수행하였다.

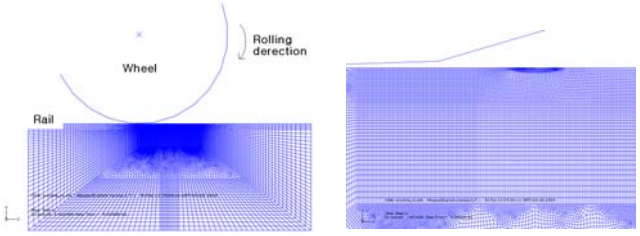
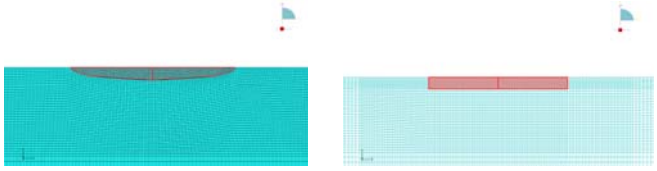


Fig. 2 F.E Model



a) b) 단순화시킨 모델

Fig. 3 WEL 모델의 단순화

Table 1 Mechanical properties

Model	Young's Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Density (kg/㎥)	Poisson' ratio
WEL	206	Elastic Material	7850	0.3
Base	206	507	7850	0.3

2.2 해석모델의 비교

WEL이 발생한 상태에서의 모델과 단순화된 모델에 대하여 유한요소해석 결과를 비교하면 Fig. 4와 같으며, 하중이 WEL 중앙을 통과 시 Von-mises 응력분포를 나타내고 있다. 최대 응력은 WEL과 모재의 경계면에서 발생하고 있으며 WEL이 탄성체로 모델링 되었기 때문이다. 기존모델에서 최대응력은 1117 MPa이 발생하고 있고, 단순화된 모델의 경우 최대응력은 1170 MPa로 유사하였고 전반적인 응력분포 경향 역시 유사하였다.

기존모델과 단순화된 모델에서의 응력이력을 비교하면 Fig. 5와 같다. 각각의 위치에서 응력의 크기를 비교하면 기존모델에서의 최대응력의 발생위치는 PW1이고 크기가 1500MPa이 발생하였고, 단순화된 모델의 경우 역시 최대응력이 PW1에서 발생하였고 크기가 1600 MPa로써 약간 크게 발생하고 있다. 각각의 위치에서의 최대응력 발생크기를 살펴보면 전반적으로 두 모델이 유사한 경향을 보이고 있다.

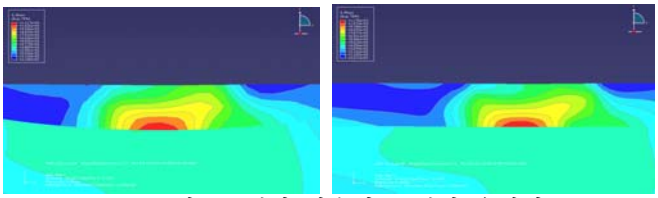


Fig. 4 기존모델과 단순화 모델의 응력비교

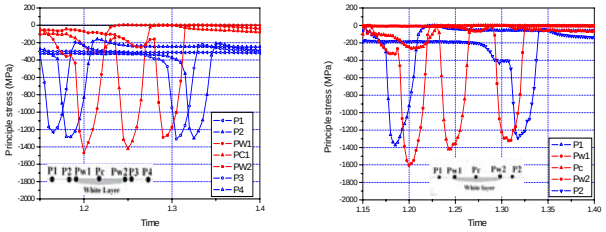
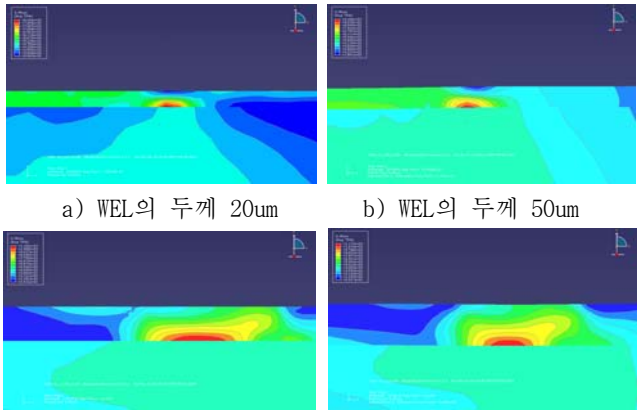


Fig.5 기존모델과 단순화 모델의 응력이력비교

2.3 WEL의 두께변화에 따른 응력분포

WEL의 두께변화에 따른 응력변화를 조사하기위하여 두께에 따른 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6은 WEL의 뚜께 변화에 따른 응력분포를 나타낸 것이다. 모든 경우에 최대응력은 WEL과 모재의 경계면에서 발생하고 있다. 그러나 최대응력의 크기는 WEL의 두께에 따라서 변화한다. 두께가 20 um인 경우에는 최대응력이 834MPa이 발생하였고, 두께가 50 um인 경우에는 934MPa이 발생하였다. 두께가 175 um인 경우에는 1150MPa, 250 um인 경우에는 1170 MPa이 발생하였다. WEL의 두께가 커지면 최대발생응력이 증가하지만 일정 두께 이상이 되면 응력의 증가폭이 작아짐을 알 수 있다.



a) WEL의 두께 20um　　b) WEL의 두께 50um

c) WEL의 두께 175um　　b) WEL의 두께 250um

Fig. 6 WEL 두께 변화에 따른 응력분포

3. 피로강도평가

3.1 피로수명 평가방법 및 물성치

시험결과 및 자료를 통하여 WEL에서 발생하는 균열은 WEL에서 하중이 부가되기 시작되는 끝단(PW1)과 중앙부(Pc)에서 발생하고 있으며 그 반대쪽(PW2)에서는 균열이 발생하지 않고 있다. 이에 대한 원인을 평가하기 위하여 피로수명평가를 수행하였다

재료가 소성변형이 발생하면 수명평가 방법은 일반적으로 많이 사용되는 ε-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.

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

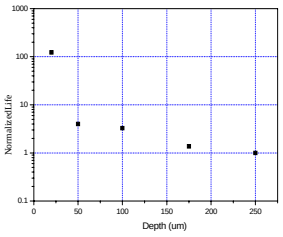
WEL의 피로수명을 평가하기 위하여는 이에 대한 피로물성치가 필요하다. 그러나 이에 대한 물성치를 얻기가 어려우므로 모재부의 피로물성치를 이용하여 평가하였다.

Table 2 Material properties for fatigue analysis

G (GPa)	σ_f' (MPa)	ε_f' (%)	b	c	τ_ε' (MPa)	γ_ε' (%)
80,385	1,288	25.2	-0.103	-0.46	744	43.6

3.2 수명평가 결과

Fig. 7은 WEL의 두께변화에 따른 접촉피로수명을 나타낸 것으로 가장 짧은 수명을 기준으로 무차원화 시켰다. 접촉피로수명이 가장 긴 것은 WEL의 두께가 20um 인 경우이다. WEL의 두께가 깊어질 수록 접촉피로수명은 짧게 평가가 되었으며, WEL의 두께가 50um 부터는 피로수명이 급격이 짧아짐을 알 수있다. 일정 두께 이상에서는 피로수명의 감소폭이 작았다. Fig. 8은 WEL의 두께 변화에 따른 잔류응력 크기를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 잔류응력은 WEL의 두께가 20um인 경우에는 -750MPa로써 크게 발생하고 있지만 다른 두께의 경우에는 잔류응력이 거의 발생하지 않고 있다. 이러한 경향은 피로수명의 경향과 거의 일치하고 있다. 따라서 WEL의 두께에 따른 접촉피로수명은 두께의 변화에 따른 최대응력의 크기와 잔류응력의 영향이라고 판단할 수 있다.



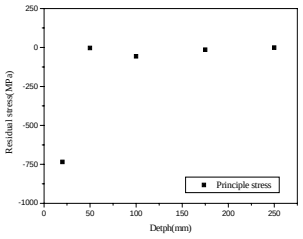


Fig. 7 두께에 따른 수명　　Fig. 8 두께에 따른 잔류응력

4. 결론

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

1. WEL의 두께가 깊어지면 최대발생응력이 증가하지만 일정 두께 이상이 되면 응력의 증가폭이 작아졌다.
2. 접촉피로수명이 가장 긴 것은 WEL의 두께가 20um 인 경우이며, WEL의 두께가 깊어질 수록 접촉피로수명은 감소하였다. WEL의 두께가 50um 부터는 피로수명이 급격이 감소하므로 이에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다..
3. 잔류응력은 WEL의 두께가 20um인 경우에는 -750MPa로써 크게 발생하고 있지만 다른 두께의 경우에는 잔류응력이 거의 발생하지 않았다. WEL의 두께에 따른 접촉피로수명은 두께의 변화에 따른 최대응력의 크기와 잔류응력의 영향이다

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