

◆ 특집 ◆ 철도의 고속화를 위한 차륜-궤도 인터페이스

White etching layer 의 두께변화에 따른 접촉피로수명 평가

Contact Fatigue Analysis of White Etching Layer according to Thickness Variation

서정원^{1,✉}, 권석진¹, 전현규¹, 이동형¹
Jung Won Seo^{1,✉}, Seok Jin Kwon¹, Hyun Ku Jun¹ and Dong Hyong Lee¹

¹ 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 (Vehicle/Track Research Department, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: jwseo@krii.re.kr, Tel: 031-460-5210

Manuscript received: 2010.4.5 / Revised: 2010.6.18 / Accepted: 2010.6.29

White Etching Layer(WEL) is a phenomenon that occurs on the surface of rail due to wheel/rail interactions such as excessive braking and acceleration. Rolling Contact Fatigue(RCF) cracks on the surface of rail have been found to be associated with WEL. In this study, we have investigated RCF damages of white etching layer using twin disc testing and fatigue analysis. These tests consist of wheel flat tests and rolling contact fatigue tests. WEL has been simulated by wheel flat test. It has been founded that the WEL with a bright featureless contrast is formed on the surface of specimen by etching. Rolling contact fatigue test was conducted by using flat specimens with the WEL generated by the wheel flat test. It has been observed that two types of cracks occur within the specimen. The contact fatigue test was simulated in 2D elastic-plastic FE simulations. Based on loading cycles obtained from the finite element analysis, the fatigue life analysis according to the thickness variation of WEL was carried out. The longest fatigue life was observed from the thickness of 20um.

Key Words: Rolling Contact Fatigue (구름접촉피로), White Etching Layer (WEL, 백색층), Finite Element Analysis (유한요소해석)

기호설명

b = Shear fatigue strength exponent

c = Shear fatigue ductility exponent

K = Material constant

E = Young's modulus

$\Delta\gamma_{\max}$ = Shear strain range

$\Delta\sigma_{n,\max}$ = Maximum normal stress

σ_y = Yield strength

τ_f = Shear fatigue strength coefficient

γ_f = Shear fatigue ductility coefficient

1. 서론

레일의 구름접촉피로손상인 Head check, Squats 등은 현재 중요한 문제로 대두되고 있다.¹⁻³ 레일의 파손은 많은 인명과 재산 피해를 일으키는 차량의 탈선의 원인이 되므로, 레일표면에 발생하는 손상을 줄이기 위해서는 파손메카니즘의 이해가 중요하다. 이러한 손상은 레일의 유지보수 및 레일 교환의 원인 중에 하나이다. White etching layer(WEL)는 레일 표면에 발생하는 현상 중에 하나이며, 구름접촉피로손상과 관련이 있다고 알려져 있다.⁴⁻⁷ 이러한 명칭은 광학현미경을 통하여 흰색형상의 특징을 갖고 있기 때문에 붙여졌다. WEL은 금속조직관찰을 위해 나이탈용액으로 에칭시에 부식에

대한 저항성이 높기 때문에 이러한 특성이 나타난다.⁴ WEL 은 과도한 제동과 가속시에 차륜/레일의 상호작용에 의하여 온도가 상승하고 이로인하여 형성된다고 알려지고 있다.⁶ Carroll and Makino⁸⁻¹⁰ 는 스폿용접과 시험편을 다른 시험편에 강제적으로 미끄러지게하는 접촉피로시험을 통하여 시험실에서 WEL 을 모사하였다. Warren¹¹ 은 유한요소해석을 통하여 기계가공에 의해 형성된 WEL 과 잔류응력이 구름접촉시 발생하는 응력과 변형율에 미치는 영향을 평가하였다. Kato¹² 는 RCF 시험과 F.E.해석을 이용하여 철도차량 차륜에 발생한 WEL 의 균열발생수명을 평가하는 방법을 제안하였다. WEL 에 의하여 접촉피로손상이 발생하면 큰 충격하중이 발생하여 레일 및 차량에 안전에 영향을 주며, 적절한 시기에 제거하지 않으면 레일의 과단시커 대형 사고를 유발한다. 레일 손상 예방을 위한 한 가지 방법으로는 WEL 의 두께를 주시하여, 일정두께가 도달하였을 경우에는 예방삭정을 하여는 방법이 있다. 이와 관련하여 일본에서는 레일 두부의 반발계수를 이용하여 WEL 의 두께를 측정하는 방법이 검토되고 있다.⁶ 예방삭정을 위해서는 WEL 의 두께가 어느정도 되었을 경우에는 레일손상 혹은 균열 발생의 가능성이 높아지는지에 대한 정략적인 평가가 중요하다.

본 논문에서는 twin-disc 시험과 유한요소해석을 통하여 WEL 의 거동 및 RCF 손상을 조사하였다. 또한 유한요소해석 및 접촉피로수명평가를 통하여 WEL 의 두께변화가 수명에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 차륜찰상시험 및 구름접촉피로시험

2.1 시험편 및 시험조건

차륜 찰상에 따른 WEL 의 효과를 조사하기 위하여, 차륜 찰상시험을 실시하였다. Fig. 1 은 차륜과 레일의 시험편을 보여주고 있으며, 시험편은 차륜의 림부와 레일의 복부에서 채취하였다. 차륜 시험편은 직경이 50mm 이고 두께가 5mm, 레일 시험편은 직경이 50mm 이고 두께가 15mm 로 제작하였다. Fig. 2 는 시험방법을 도식적으로 보여주고 있다.⁸⁻¹⁰ 차륜 찰상시험은 그림에서와 같이 두개의 시험편을 접촉시켜 시험을 수행한다. 첫번째로, 모터에 의하여 차륜시험편을 회전시키면, 차륜시험편에 접촉해있는 레일시험편도 동시에 회전한다. 이때 차륜시험편의 속도는 1500rpm 이고, 시험편

사이의 헤르쯔안 접촉압력은 1500MPa 이다. 윤활 조건으로 물을 사용하였고 접촉면에 연속적으로 분사하였다. 두번째 순서로써, 회전하고 있는 레일 시험편을 제동장치를 이용하여 정지시키고, 수 초 후에 모터를 정지시킨다. 이때 차륜시험편이 레일 시험편 위로 미끄러지면서 찰상이 발생한다. 이때 WEL 이 생성되며 토크는 급격히 증가한다. 구름접촉동안에 WEL 의 거동을 조사하기 위하여, 찰상시험으로 WEL 이 형성된 시험편을 이용하여 접촉피로시험을 수행하였다. WEL 이 존재하는 레일 시험편을 새로운 차륜시험편과 접촉시켜서 1×10^5 짜이클까지 접촉피로시험을 실시하였다.

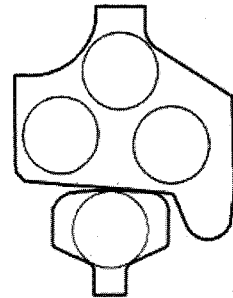


Fig. 1 Configuration of specimen

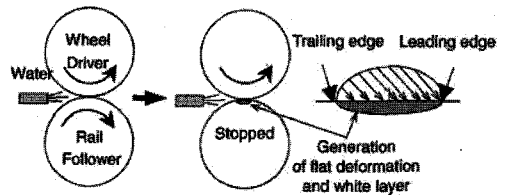


Fig. 2 Schematic illustration of test method¹⁰

2.2 White Etching Layer 의 형성

WEL 을 관찰하기 위하여 광학현미경과 SEM 을 이용하였고 이를 위하여 금속조직관찰을 위한 절차를 통하여 샘플을 준비하였다. 샘플은 시험편을 절단하고, 마운팅 및 폴리싱한 후에 2% 나이탈액에 10 초동안 에칭시켜서 제작하였다. Fig. 3 은 금속현미경 사진을 보여주고 있다. 접촉표면에 형성된 밝은 색의 WEL 을 관찰할 수 있으며 두께가 약 250 μ m 이다. Fig. 4 는 WEL 의 중앙부위에서 표면으로부터 깊이방향으로 미소경도의 변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 WEL 이 형성된 깊이방향으로 3 개의 영역, WEL, 천이지역, 모재부분으로 구분할 수 있다. 모든 시험편에서 WEL 의 최대

경도는 표면에서 890HV 이고, 이와 비교하여 모재 부위의 평균 경도는 360HV 가 발생하였다.

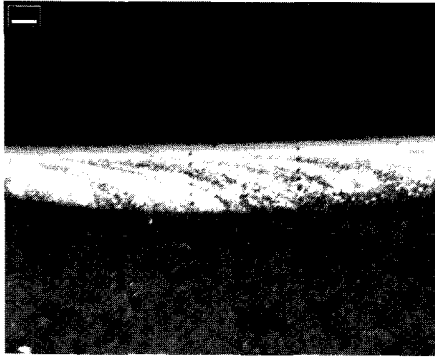


Fig. 3 Optical micrograph of WEL

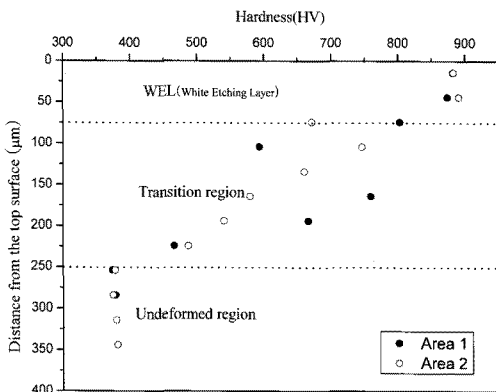


Fig. 4 Micro hardness variation

3. 유한요소해석 및 피로수명평가

3.1 유한요소 모델 및 하중조건

해석모델은 Fig. 5 와 같이 WEL 이 포함된 레일 시험편은 Plain strain 요소로 모델링하였고 차륜시험편의 경우에는 강체(Rigid Body)로 모델링하였다. 레일 모델에 사용된 요소갯수(Element)는 32,375 개이며 절점갯수(Node)는 35,669 개이다. WEL 은 모재에 비하여 취성이면서 높은 경도를 가지고 있기 때문 탄성체로 모델링하였고 그 외의 부분은 탄소성 재료로 모델링 하였다.^{7,8} 해석에 사용된 물성치는 Table 1 과 같다. 탄소성 해석에서 항복조건은 Von-mises, 유동성경화법칙(Kinematic Hardening Rule)을 사용하였다. 해석방법은 차륜에 하중을 부가하여 레일위를 반복적으로 회전하도록 하였으며 ABAQUS/Explicit 를 이용하여 해석을 수행하였다.

Table 1 Material properties used for stress analysis^{11,12}

Material	E (GPa)	σ_y (MPa)	Density (kg/m ³)	ν
WEL	206	-	7,850	0.3
Bulk	206	507	7,850	0.3

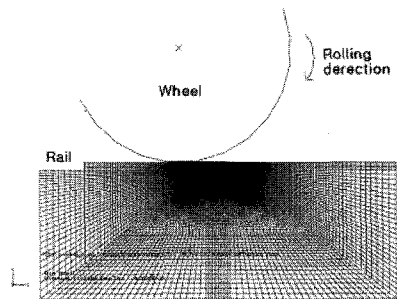


Fig. 5 Finite Element model

3.2 피로해석방법

접촉하중이 작용하였을때의 피로수명평가는 베어링 분야에 많이 이루어 졌으며 재료의 거동에 따라서 다양한 방법이 적용된다.^{13,14} 재료가 소성 변형이 발생하면 수명평가 방법은 일반적으로 $\epsilon-N$ 방법이 많이 사용되며, 전단변형률이 파손의 지배적인 경우에는 Coffin-Manson 식을 최대 전단진폭으로 표현된 식을 이용한다. 일반적으로 접촉피로의 경우는 전단변형률이 파손의 지배적이기 때문에 다음의 식을 이용하여 평가하였다.^{15,16}

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

4. 해석결과 및 토의

4.1 구름접촉에 따른 WEL 의 거동

차륜/레일의 구름접촉시에는 작은 하중에서도 소성변형이 발생하며, 첫 번째 구름접촉시에 발생한 접촉응력이 항복강도를 초과하기 때문에 재료는 소성변형을 일으키고 접촉면 내부에서는 잔류응력이 생성된다. Fig. 6 은 첫번째 구름접촉후의 잔류응력 분포를 보여주고 있다. WEL 이 없는 부위에서는 잔류응력이 표면 아래에서 발생하고 있으나, WEL 이 존재하는 부위에서는 WEL 의 아래면에서 발생하고 있다. 이러한 잔류응력은 두번째

구름접촉에 영향을 미치어 하중의 크기에 따라서 Elastic shakedown, Plastic shakedown 및 Ratchetting 등의 거동을 일으키게 된다. Fig. 7은 구름접촉시 각각의 접촉위치에서의 응력이력을 보여주며, 최대응력은 WEL 이 시작되는 위치(Pw1)에서 발생한다. WEL 의 중앙위치(Pc1)에서의 응력은 모재부분(P3, P4)에서 응력보다 크게 발생하고 있지만, WEL 의 끝단부(Pw2)에서 응력은 모재부분에서 응력과 크기가 유사하다. Fig. 8은 유한요소해석결과로 얻어진 응력과 변형률 이력을 기초하여 피로수명을 평가한 결과이다. 접촉 위치에 따른 피로수명을 평가하기 위하여 3 가지 위치, WEL 의 시작지점(Pw1), 중앙(Pcenter) 및 끝나는 지점(Pw2)에서 피로해석을 수행하였다. 피로수명평가결과는 Pw1 의 수명으로 무차원화 시켰다. 가장 짧은 피로수명은 WEL 의 시작지점(Pw1)에서 발생하였고, 가장 긴 수명은 WEL 의 끝나는 지점(Pw2)에 발생하였다. Pw2 의 피로수명은 Pcenter 와 비교하여 3 배, Pw1 과 비교하여 17 배 길게 평가되었다. 이러한 결과는 Fig. 9 에서와 같이 접촉피로시험 결과와 잘 일치하고 있다.

구름접촉피로시험후에 시험편에는 두가지 형태의 균열이 발견되었다. 첫 번째는 모재와 WEL 의 사이의 경계면에서 균열이 시작된 형태이고, 두 번째는 WEL 의 중앙에서 균열이 시작된 형태이다. Fig. 9는 WEL 에서 발생한 첫 번째 형태의 균열을 보여주고 있다. 균열은 WEL 과 모재의 경계면 끝단 표면에서 발생하였고, 경계면을 따라서 진전하고 있다. Fig. 10은 두 번째 형태의 균열로서 WEL 의 중앙에서 발생하여 수직으로 진전하고 있다. 균열이 WEL 의 중앙에서 발생할 경우에는 WEL 이 취성재료이기 때문에 균열은 수직 방향으로 WEL 과 모재의 경계면까지 빠르게 진전한다.

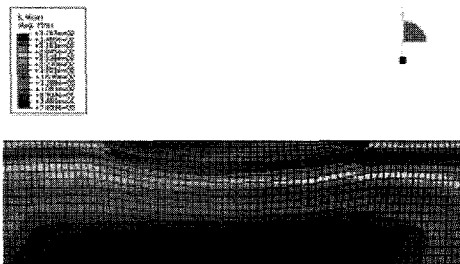


Fig. 6 Residual stress distribution

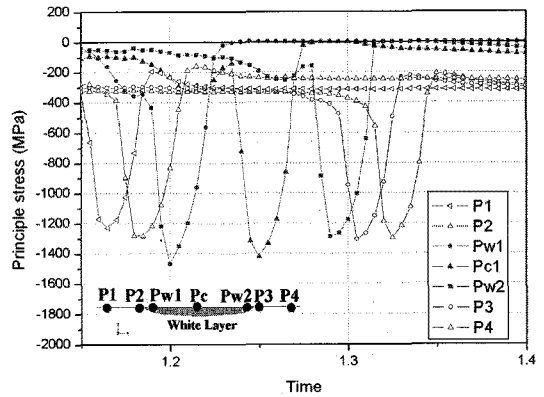


Fig. 7 Stress history according to contact points during rolling

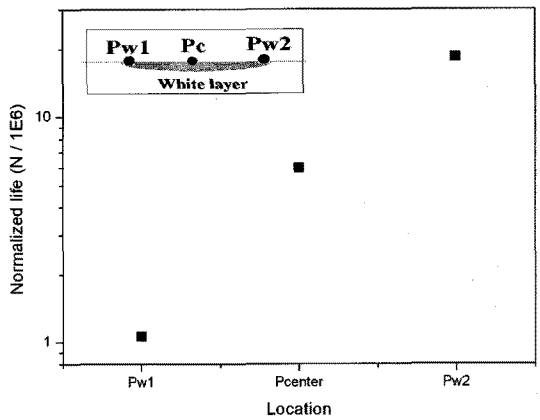


Fig. 8 Fatigue life analysis results

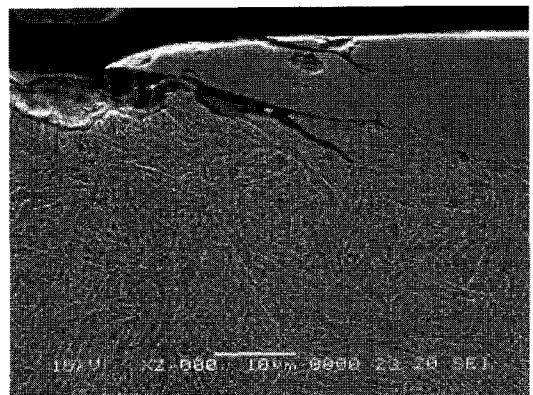


Fig. 9 Crack occurring the interface between WEL and Bulk material

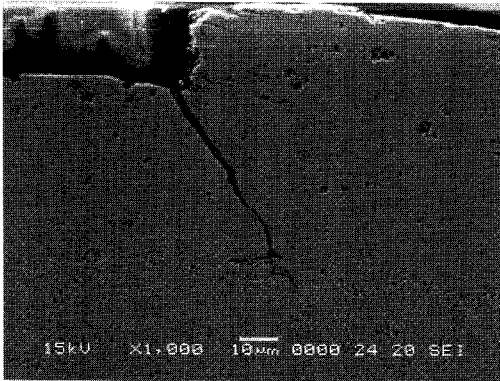
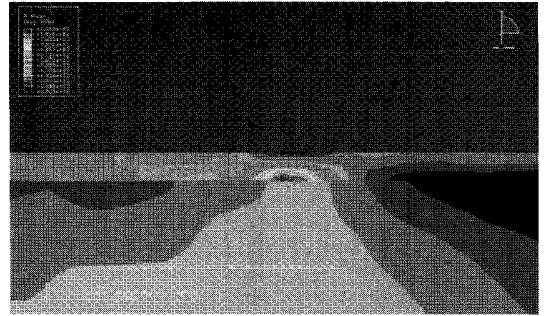


Fig. 10 Crack occurring in the middle of WEL

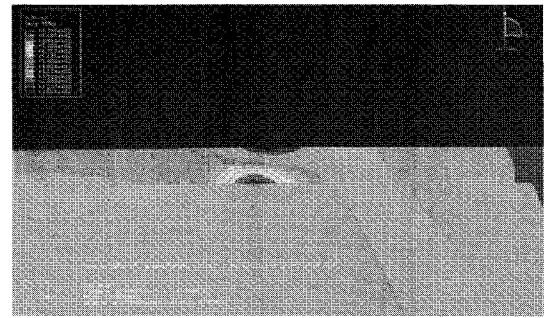
4.2 WEL의 두께변화에 따른 피로수명

WEL의 두께변화에 따른 응력변화를 조사하기 위하여 두께에 따른 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 11은 WEL의 두께 변화에 따른 응력분포를 나타낸 것이다. 모든 경우에 최대응력은 WEL과 모재의 경계면에서 발생하고 있다. 그러나 최대응력의 크기는 WEL의 두께에 따라서 변화한다. 두께가 20µm인 경우에는 최대응력이 834MPa이 발생하였고, 두께가 50µm인 경우에는 934MPa이 발생하였다. 두께가 175µm인 경우에는 1150MPa, 250µm인 경우에는 1170MPa이 발생하였다. WEL의 두께가 커지면 최대발생응력이 증가하지만 일정 두께 이상이 되면 응력의 증가폭이 작아짐을 알 수 있다.

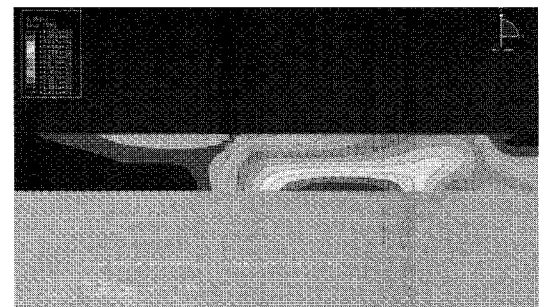
Fig. 12는 WEL의 두께변화에 따른 접촉피로수명을 나타낸 것으로 가장 짧은 수명을 기준으로 무차원화 시켰다. 접촉피로수명이 가장 긴 것은 WEL의 두께가 20µm인 경우이다. WEL의 두께가 깊어질 수록 접촉피로수명은 짧게 평가가 되었으며, WEL의 두께가 50µm부터는 피로수명이 급격히 짧아짐을 알 수 있다. 일정 두께 이상에서는 피로수명의 감소폭이 작았다. Fig. 13은 WEL의 두께 변화에 따른 잔류응력 크기를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 잔류응력은 WEL의 두께가 20µm인 경우에는 -750MPa로써 크게 발생하고 있지만 다른 두께의 경우에는 잔류응력의 크기가 작게 발생하고 있다. 이러한 경향은 피로수명의 경향과 거의 일치하고 있다. 따라서 WEL의 두께에 따른 접촉피로수명은 두께의 변화에 따른 최대응력의 크기와 잔류응력의 영향이라고 판단할 수 있다.



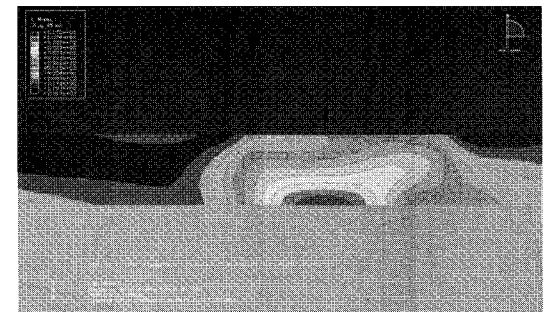
a) WEL of 20µm thickness



b) WEL of 50µm thickness



c) WEL of 175µm thickness



d) WEL of 250µm thickness

Fig. 11 Stress distribution according to thickness variations of WEL

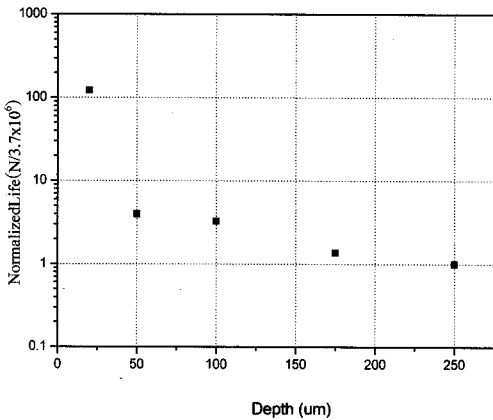


Fig. 12 Fatigue life analysis results according to thickness variations of WEL

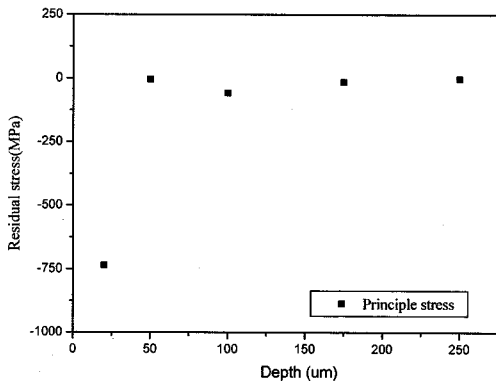


Fig. 13 Residual stress according to thickness variations of WEL

5. 결론

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

1) 찰상시험에서 두께가 250 μ m를 갖는 WEL이 접촉표면에서 형성되었다. 미소경도측정결과로부터 3가지 영역, WEL, 천이영역 및 모재로 명확하게 구분되었다. WEL의 최대 경도는 표면에서 약 890HV가 발생하였고, 모재의 평균경도는 약 360HV이었다.

2) 피로해석으로부터 가장 짧은 피로수명은 WEL의 시작지점(Pw1)에서 발생하였다. WEL의 끝나는 지점(Pw2)의 피로수명은 Pcenter와 비교하여 3배, Pw1과 비교하여 17배 길게 평가되었다. 이러한 결과는 접촉피로시험 결과와 잘 일치하고

있다. 레일에 WEL이 발생하였을 경우에는 균열의 발생과 진전을 촉진시켜서 레일 수명을 단축시킬 것으로 판단된다.

3) 접촉피로수명이 가장 긴 것은 WEL의 두께가 20 μ m인 경우이며, WEL의 두께가 깊어질수록 접촉피로수명은 감소하였다. WEL의 두께가 50 μ m부터는 피로수명이 급격히 감소하므로 이에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

4) 잔류응력은 WEL의 두께가 20 μ m인 경우에는 -750MPa로써 크게 발생하고 있지만 다른 두께의 경우에는 잔류응력이 크기가 작게 발생하고 있다. WEL의 두께에 따른 접촉피로수명은 두께의 변화에 따른 최대응력의 크기와 잔류응력의 영향이다.

참고문헌

1. Kondo, K., Yoroizaka, K. and Sato, Y., "Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling," *Wear*, Vol. 191, No. 1-2, pp. 199-203, 1996.
2. UIC Leaflet 712, "Rail defects," 2002.
3. Cannon, D. F. and Pradier, H., "Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute," *Wear*, Vol. 191, No. 1-2, pp. 1-13, 1996.
4. Wang, L., Pyzalla, A., Stadlbauer, W. and Werner, E. A., "Microstructure features on rolling surfaces of railway rails subjected to heavy loading," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 359, No. 1-2, pp. 31-43, 2003.
5. Zhang, H. W., Ohsaki, S., Ohnuma, M. and Hono, K., "Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 421, No. 1-2, pp. 191-199, 2006.
6. Jin, Y. and Isidha, M., "Analysis of white etching layer generated on rail surface," *RTRI Report*, Vol. 19, No. 9, pp. 17-22, 2005.
7. Baumann, G., Fecht, H. J. and Liebelt, S., "Formation of white-etching layers on rail treads," *Wear*, Vol. 191, No. 1-2, pp. 133-140, 1996.
8. Carroll, R. I. and Beynon, J. H., "Rolling contact fatigue of white etching layer: Part 1: Crack morphology," *Wear*, Vol. 262, No. 9-10, pp. 1253-1266, 2007.
9. Carroll, R. I. and Beynon, J. H., "Rolling contact

- fatigue of white etching layer: Part 2: Numerical results,” *Wear*, Vol. 262, No. 9-10, pp. 1267-1273, 2007.
10. Makino, T., Yanamoto, M. and Fujimura, T., “Effect of material on spalling properties of railroad wheels,” *Wear*, Vol. 253, No. 1-2, pp. 284-290, 2002.
 11. Warren, A. W. and Guo, Y. B., “Numerical investigation on the effect of machining-induced white layer,” *Trib. Trans.*, Vol. 48, No. 3, pp. 436-441, 2005.
 12. Kato, T., Sugeta, A. and Makita, T., “Evaluation of rolling contact fatigue properties of white layer in railway wheel steel,” *J. of Society of material Science*, Vol. 56, No. 12, pp. 1050-1155, 2007.
 13. Ok, Y. G., An, D. M., Cho, Y. J. and Lee, H. W., “Study on the Fatigue Limit at Random Contact Loading,” *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 84-91, 2002.
 14. Kim, T. W. and Cho, Y. J., “Stress based Fatigue Life Prediction for Ball Bearing,” *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 44-55, 2007.
 15. Han, C., Chen, X. and Kim, K. S., “Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading,” *Int. Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 9, pp. 913-922, 2002.
 16. Guo, J. B. and Barkey, M. E., “Modeling of rolling contact fatigue for hard machined components with process-induced residual stress,” *Int. Journal of Fatigue*, Vol. 26, No. 6, pp. 605-613, 2004.