

< 논문 >

초기 잔류응력과 접촉표면 제거가 접촉피로수명에 미치는 영향

서정원[†] · 허현무* · 구병춘* · 최재봉** · 김영진**

(2004년 10월 25일 접수, 2004년 12월 23일 심사완료)

Effects of Metal Removal and Initial Residual Stress on Contact Fatigue Life

Jung-Won Seo, Hun-Mu Hur, Byeong-Choon Goo, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim

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

Abstract

Damage often occurs on the surface of railway wheel by wheel-rail contact fatigue. It should be removed before reaching wheel failure, because wheel failure can cause derailment with loss of life and property. The increase or decrease of the contact fatigue life by the metal removal of the contact surface were shown by many researchers, but it has not explained precisely why fatigue life increases or decreases. In this study, the effect of metal removal depth on the contact fatigue life for railway wheel has been evaluated by applying finite element analysis. It has been revealed that the residual stress and the plastic flow are the main factors determining the fatigue life. The railway wheel has the initial residual stress formed during the manufacturing process, and the residual stress is changed by thermal stress induced by braking. It has been found that the initial residual stress determines the amount of metal removal depth. Also, the effects of the initial residual stress and metal removal on the contact fatigue life has been estimated, and an equation is proposed to decide the optimal metal removal depth for maximizing the contact fatigue life.

기호설명

2a : 접촉면의 직경

H_v : 비커스 경도

d : 표면으로부터 깊이

k : 전단 항복강도

σ_y : 항복강도

P_{max} : 헤르츠안 분포에 최대 접촉압력

1. 서론

차륜에 발생하는 손상은 크게 마모, 박리(Spalling, Shelling), 제동열에 의한 열크랙 등으로 구분 할 수 있으며 이러한 손상이 발생할 경우에는 손상이 발생한 두께만큼 제거해야 한다(Reprofiling). 차륜의 경우에는 접촉면(Rim 부)이 일정한 두께를 가지고 있으며 접촉면에 손상이 발생할 경우에 일정량을 제거하여 사용하도록 되어 있으며 정해진 한도만큼 제거되면 수명이 다하게 된다. 기존에는 접촉면의 제거가 주로 마모에 의한 것이 많이 발생하였으나 재질 개선, 선로 및 차량의 개선으로 많이 감소하였고 최근에는 차륜 및 레일의 접촉피로손상에 의한 것이 증가하는 추세에 있다. 접촉피로손상이 발생할 경우에는 많은 양

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원

E-mail : jwseo@krrri.re.kr

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

* 회원, 한국철도기술연구원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

을 제거하여야 하므로 차륜의 수명이 크게 단축되며, 차륜의 파손 위험으로 인한 차량운행 제한 조치로 많은 손실이 발생한다. 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 수행된 바 있으며 최근에 접촉면 손상에 대한 연구가 진행중이다.⁽¹⁻³⁾

차륜의 수명을 연장하고 접촉피로손상을 막을 수 있는 방법의 하나로는 손상의 발생전에 주기적으로 차륜의 접촉면의 일정량을 제거하는 것이다. 이를 위하여는 적절한 제거주기 및 제거량이 설정되어야 한다. Cretu⁽⁴⁾ 등은 미리 큰 하중으로 일정사이클의 구름접촉(Prerolling)을 시켜서 발생된 내부의 압축잔류응력이 접촉피로수명을 증가시킴을 보였으며, Tahkashi⁽⁵⁾ 등은 소성변형이 큰 재료 및 작은 재료에 대하여 시험을 실시하여 소성변형이 큰 재료의 수명이 길다는 것을 보였다. Makoto⁽⁶⁾ 등은 레일에 발생하는 표면균열에 대하여 주기적인 그라인딩이 레일의 접촉피로수명을 증가시킴을 실험을 통하여 입증하였고, Steele⁽⁷⁾은 레일에 대하여 실험을 통하여 적정량의 그라인딩으로 수명이 증가하지만 어느 한도 이상의 그라인딩은 수명이 감소됨을 보였다. Lee⁽⁸⁾ 등은 S45C의 재질을 이용하여 수명증가를 위한 최적의 접촉면 제거량을 제시하였다. 현재까지의 연구는 주로 레일 등에서 발생하는 표면균열에 대하여 접촉면을 제거하여 수명을 연장시키는 방안에 대한 연구가 수행되었으나 접촉면 제거에 따른 수명증가 및 감소원인을 명확하게 설명하지 못하였으며 특히 초기 잔류응력의 영향은 고려하지 않고 있다.

차륜의 경우에는 제작시 잔류응력이 생성되고 마찰계동시 잔류응력이 변화하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 접촉표면 제거량에 따른 접촉피로수명의 증가 및 감소원인을 파악하기 위하여 유한요소해석을 실시하였고 초기 잔류응력이 접촉면 제거량에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 접촉표면 제거깊이에 따른 접촉피로수명 평가

2.1 유한요소모델 및 평가 절차

Lee⁽⁸⁾ 등은 Prerolling 후 그라인딩 깊이에 따

라 접촉피로시험을 실시하였고 Fig. 1과 같이 최적의 그라인딩 깊이가 있음을 입증하였다. 시험은 탄소강 S45C를 사용하고 윤활조건으로는 파라핀 오일을 사용하였다. 최적의 그라인딩 깊이는 Prerolling 후 최대 경도가 발생한 부위 근처인 $0.89 \times a$ (접촉길이의 1/2)로 제안하였다. 또한 Prerolling 시 사이클에 따라 반복적인 소성변형(cyclic hardening)에 의하여 경도가 증가하게 되며 어느 사이클 이상에서는 일정한 값으로 수렴한다는 현상을 바탕으로 적정한 Prerolling 사이클 수를 1.5×10^5 으로 제안하였다. 수명증가원인으로는 손상이 발생한 접촉면의 탈락과 소성변형으로 설명하고 있지만 일정 깊이 이상을 그라인딩 하였을 경우에 수명이 감소하는 원인에 대하여는 설명하지 못하고 있다.

수명감소 원인을 파악하기 위하여는 접촉면 내부에 발생하는 소성변형 및 잔류응력 등을 평가하여야 하므로, 본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 이를 평가하였다.

Fig. 2는 접촉면 제거에 따른 수명을 평가하기 위한 절차를 나타내고 있다. 첫번째로 Prerolling을 실시하여 접촉면 내부에 잔류응력 및 소성변형이 발생하는 현상을 모사하였고 다시 일정량을 제거하고 구름접촉 해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 얻어진 변형률 이력을 바탕으로 수명을 평가하였다. Fig. 3은 유한요소 모델을 나타내고 있으며 구름 접촉은 Hertz 분포하중이 연속적으로 이동하도록 하여 모사하였고 응력 및 변형률을 얻기 위한 곳은 요소를 세분화하여 모델링하였다.

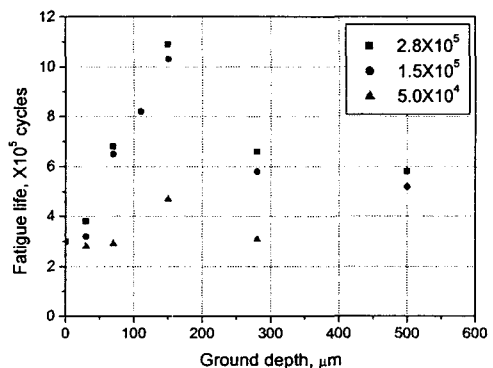


Fig. 1 Contact fatigue life due to ground depth⁽⁸⁾

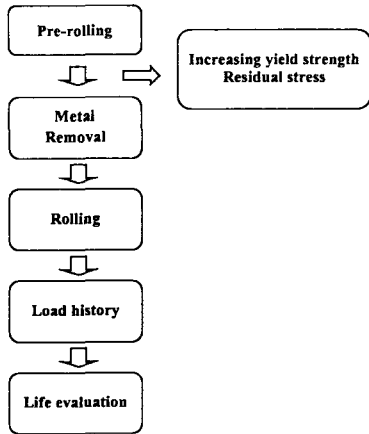


Fig. 2 Procedure for fatigue life evaluation due to metal removal

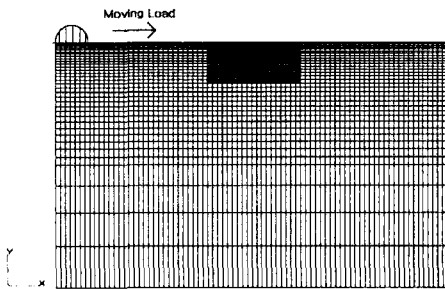


Fig. 3 Finite element model

2.2 접촉피로시험

본 연구에서는 접촉피로시험을 수행하였다. 이를 통해 구름접촉 시 발생하는 소성 변형 및 잔류응력을 검증하였으며, Pre-rolling 시 소성변형에 의한 항복강도의 증가를 측정하여 유한요소 해석의 입력치로 사용하였다.

2.2.1 시험편 채취 및 형상

Fig. 4는 시험편 채취 위치를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 차륜 시험편은 차륜의 두부에서 채취하였고 레일의 경우에는 두부에서 판부까지에서 채취하였다. Fig. 5는 차륜 및 레일 시험편의 형상을 나타내고 있으며 상호 접촉하여 시험을 실시하였다.

차륜시험편의 치수 및 형상은 직경이 90mm이고 두께는 15mm이며 레일 시험편은 직경이 110mm이고 두께는 15mm이다. 시험시 접촉면의

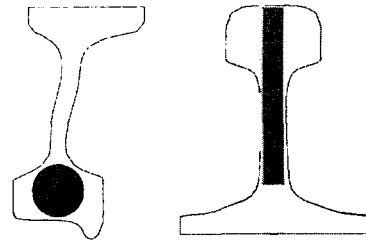


Fig. 4 Location of specimen

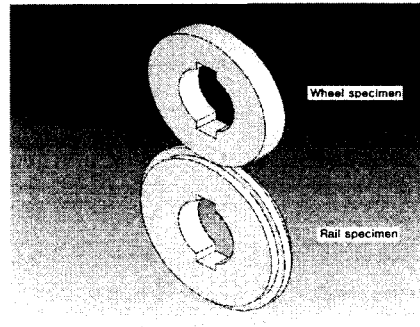


Fig. 5 Configuration of specimen

접촉응력 및 시험기 하중을 고려하여 접촉면이 5mm가 되도록 하였고 레일시험편에는 접촉 시험시 마모가 되어도 일정한 접촉응력이 유지되도록 하였다.

시험편 접촉면의 경도를 일정하게 유지하기 위하여 열처리를 실시하였고 접촉면의 조도를 맞추기 위하여 연삭을 실시하였다.

2.2.2 실험방법 및 조건

접촉피로시험을 실시하기 위하여 Fig. 6과 같은 장치를 구성하였다. 접촉시험편의 슬립비(Slip ratio)를 조절하기 위하여 두 개의 모터를 이용하였고 이때 발생하는 토크를 측정할 수 있도록 하였다. 균열 및 손상은 진동신호 및 사이클을 연속적으로 컴퓨터에 저장하여 진동신호가 어느 수준이상이면 손상이 발생한 것으로 하였으며, 동시에 50,000 사이클마다 시험기를 정지시켜 균열 여부를 현미경으로 관찰하였다.

시험조건으로는 하나의 시험편만 회전하는 순수구름상태로 하였고 접촉응력을 1000 - 1500 Mpa로 변화시켜가면서 시험을 실시하였다. 윤활 조건으로는 물이 연속적으로 접촉면에 떨어지도록 하였다.

2.2.3 시험결과

Fig. 7은 2×10^5 사이클 이후까지 시험한 후 측정된 깊이에 따른 경도변화이다. 경도의 측정은 비커스 미소 경도계를 이용하여 측정하였다. 시험 후 측정된 경도는 반복적인 접촉하중에 의한 가공경화(strain hardening)에 의하여 증가하는 것으로 나타났다. 하중이 증가함에 따라 경도의 최대값이 증가함을 알 수 있고 최대치는 최대 전단응력이 나타나는 부근에서 발생하고 있다.

본 논문에서는 Prerolling시 발생하는 반복적인 소성변형에 의한 항복강도 증가를 경도 측정결과를 이용하여 평가하였다. Jones⁽⁹⁾ 등은 항복강도와 경도의 관계를 다음 식과 같이 표현하였다.

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = \frac{H_v}{3\sqrt{3}} \quad (1)$$

여기서, k: 전단항복강도, σ_y : 항복강도, H_v : 비커스 경도이다.

식(1)에 따르면 항복강도와 경도는 비례하며 본 논문에서는 이를 바탕으로 Prerolling 이전의 경도(H_{v1})와 Prerolling 이후의 경도(H_{v2})의 비율을 Wang⁽¹⁰⁾ 등이 잔류응력 측정결과를 곡선적합하기 위한 식을 이용하여 다음과 같이 d/a의 함수로 나타내었다.

$$\frac{H_{v2}}{H_{v1}} = \frac{(A + B(C * \frac{d}{a})^2)}{(1 + (C * \frac{d}{a})^2)} + 1 \quad (2)$$

여기서, H_{v1} : 구름접촉 전의 경도,
 H_{v2} : 구름접촉 후의 경도,
 d: 표면에서의 깊이,
 a: 접촉길이의 1/2, A,B,C: 상수 이다.

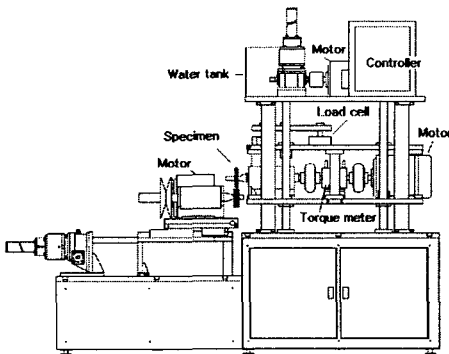


Fig. 6 Contact fatigue testing machine

식 (2)는 Fig. 7에 대한 곡선적합을 통해 구한 것으로 각각의 상수 A,B,C는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 8은 깊이에 따른 잔류응력의 변화를 나타낸 것으로, 잔류응력의 측정은 천공법을 이용하였고 3회 측정결과이다. 원주방향의 잔류응력은 압축잔류응력으로 나타났으며 해석치와 실험치는 Fig. 8에 도시한 것과 같이 전반적으로 잘 일치하였다.

Table 1 Constants obtained from the curve fitting method

P_{max} (MPa)	A	B	C
1190	0.10	0.80	1.1
1285	0.14	0.90	1.1
1373	0.15	1.10	1.1

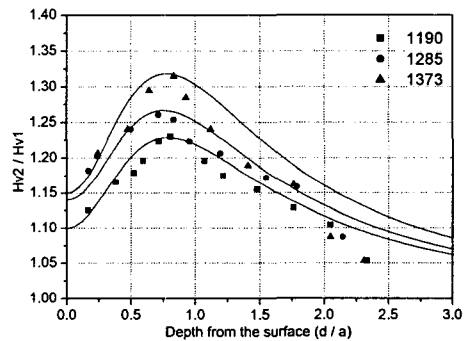


Fig. 7 Variation of microhardness ratio after 2×10^5 cycles

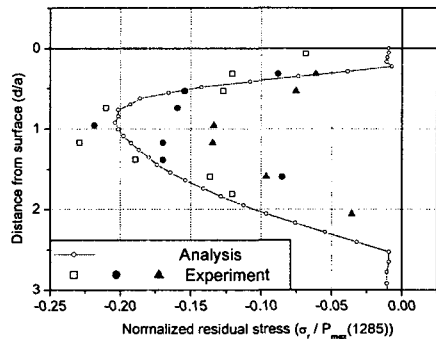


Fig. 8 Comparisons of residual stresses between analysis and experiment

2.3 수명평가 결과 및 토의

표면제거량에 따른 수명을 평가하기 위하여 일정 두께의 요소를 제거시키면서 수명을 계산하였다. 수명평가지 차륜이 레일을 구르는 운동을 접촉하중의 움직임으로 모사하여 접촉압력이 첫 부분에서 마지막 부분까지 이동하였을 경우를 차륜이 한번 회전한 것으로 설정하였다. 이때 각각의 부위에서 발생하는 변형률 이력을 구하여 이를 바탕으로 수명을 평가하였다.⁽¹⁰⁾ Fig. 9는 표면제거 두께에 따른 수명평가 결과로서 제거 두께가 증가함에 따라 수명이 증가하였고 일정 두께 이상을 제거하는 경우에는 수명이 다시 감소하였다.

반복적인 가공경화에 따른 항복강도의 증가를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에서 최대수명이 발생한 깊이는 $d/a = 0.89$ 로 동일하게 나타났으며 이는 실험결과와 일치한다. 가공경화에 따른 증가된 항복강도를 입력했을 경우 피로수명이 크게 증가하였다.

표면제거에 따른 수명증가 및 감소 원인을 파악하기 위하여 각각의 두께 제거시의 변형률 상태를 조사하였다. Fig. 10은 표면 제거 후 첫번째 구름접촉을 적용한 후의 잔류 변형률 해석결과를 나타낸 것으로 잔류 변형률이 감소 후 다시 증가하고 있다. Prerolling시 최대 잔류 변형률이 발생한 위치(d_{max_pre})보다 적은 량을 제거하였을 경우에는, Prerolling시 발생한 잔류 변형률의 영향으로 d_{max_pre} 부근에서 잔류 변형률이 최대로 나타났다. 반면, d_{max_pre} 이상의 두께를 제거하였을 경우에는 최대 변형률 발생지점이 제거깊이에 따라 이동하며 그 크기는 점점 감소하다 다시 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 표면 제거 후 구름접촉시의 전단 변형률을 나타낸 것으로 표면 제거량이 증가함에 따라 변형률의 최대값은 감소하다가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 변형률의 크기가 작을수록 수명은 길어지므로 최대 수명이 발생하는 제거깊이(d/a)는 0.89 부근으로 판단하였다.

수명평가에 이용된 변형률의 증가 및 감소원인을 평가하기 위하여 각각 해석절차시의 변형률을 살펴보았다.

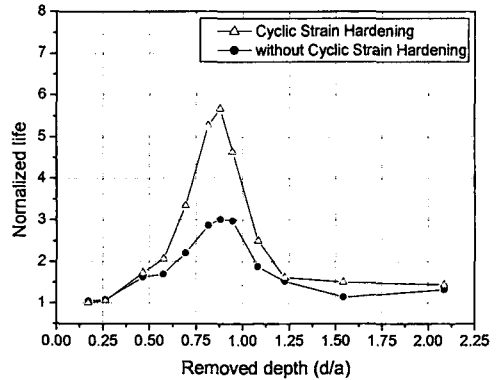


Fig. 9 Fatigue life according to metal removal depth

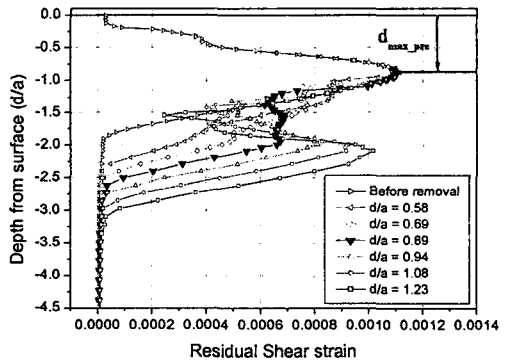


Fig. 10 Variation of residual shear strain after 1st rolling after metal removal.

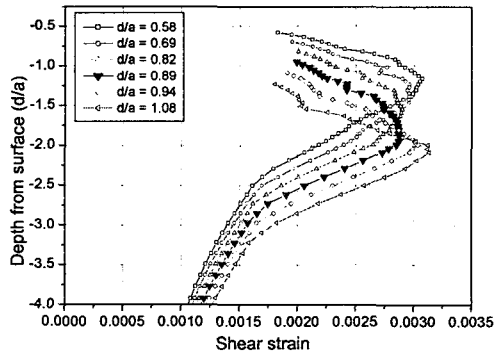


Fig. 11 Variation of shear strain during 2nd rolling after metal removal

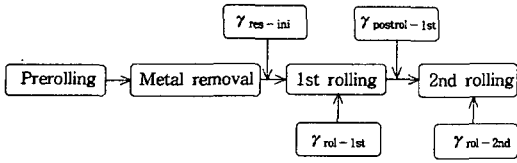


Fig. 12 A schematic illustration Evaluation procedure

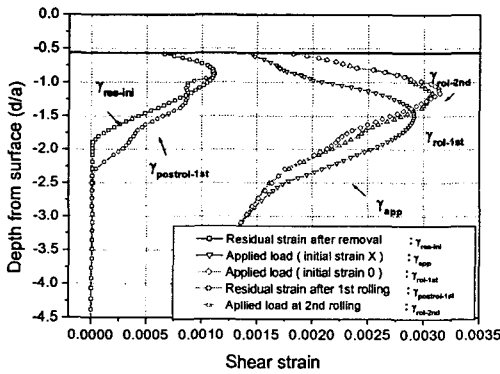


Fig. 13 Strain with removed depth, $d/a = 0.58$

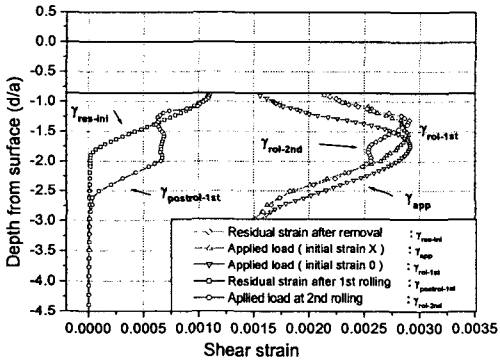


Fig. 14 Strain with removed depth, $d/a = 0.89$

Fig. 12는 수명평가절차에서 언급한 변형을 각각에 대한 설명을 나타내며, Fig. 13은 표면으로부터 $d/a=0.58$ 지점까지 제거했을 경우 깊이방향에 따른 변형을 분포이다.

여기서, γ_{app} : 초기잔류변형률이 없을 때 전단변형률,

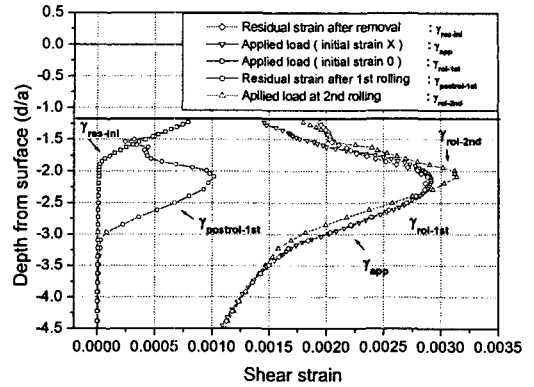


Fig. 15 Strain with removed depth, $d/a = 1.23$

$\gamma_{res - ini}$: 표면제거 후 전단변형률,
 $\gamma_{rol - 1st}$: 첫 번째 구름접촉시 전단변형률,
 $\gamma_{postrol - 1st}$: 첫 번째 구름접촉후 전단변형률,
 $\gamma_{rol - 2nd}$: 두 번째 구름접촉시 전단변형률이다.

Fig. 13에서 γ_{app} 의 최대치는 $d/a = -1.5$ 부근에서 나타났으나 $\gamma_{res - ini}$ 를 고려할 경우 $\gamma_{rol - 1st}$ 의 최대치는 $d/a = -1.2$ 부근으로 이동하였다. 또한 변형률의 최대값 역시 $\gamma_{res - ini}$ 의 영향에 의하여 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 표면제거후 첫 번째 구름접촉후의 잔류변형률($\gamma_{postrol - 1st}$)은 $\gamma_{res - ini}$ 에 비해 최대값은 같으나 깊이에 따른 분포가 변화하는 것으로 나타났으며, 그 영향이 2차 구름접촉시 변형률 분포($\gamma_{rol - 2nd}$)에 반영되었으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 14는 표면으로부터 $d/a=0.89$ 지점까지 제거했을 경우의 변형률 분포이다. γ_{app} 의 최대치가 발생한 위치는 Prerolling에서 잔류변형률($\gamma_{res - ini}$)이 없어지는 부근에서 발생하고 있다. $\gamma_{rol - 1st}$ 의 최대값이 발생한 부위는 γ_{app} 의 최대값이 발생한 부위의 위쪽이지만 그 크기는 비슷하다. 이것은 $\gamma_{res - ini}$ 의 값이 없어지는 위치에서 γ_{app} 의 최대값이 발생하였기 때문이다.

Fig. 15는 표면으로부터 $d/a=1.23$ 지점까지 제거했을 경우로서 $\gamma_{rol - 1st}$ 와 γ_{app} 의 최대값 발생

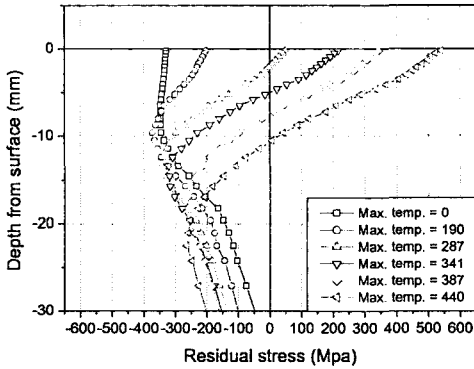


Fig. 16 Residual stress variation according to braking condition

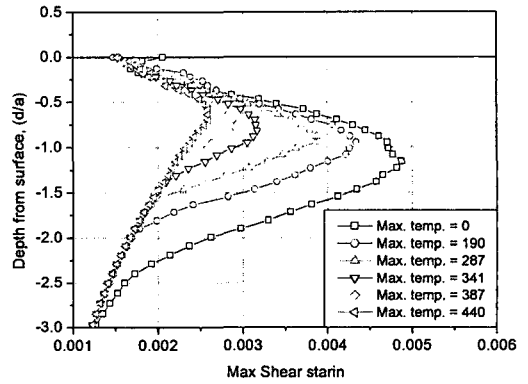


Fig. 18 Maximum shear strain depth according to residual stress variation

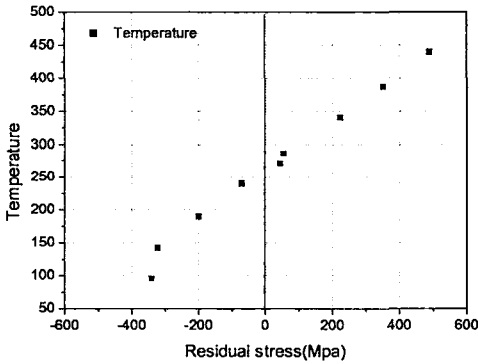


Fig. 17 Residual stress variation according to maximum temperature

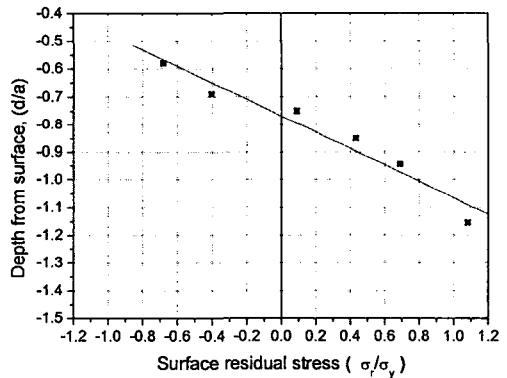


Fig. 19 Relationship between the magnitude of the surface residual stress and the depth of the maximum shear strain

깊이가 동일하다. 최대값이 발생한 이전의 깊이에서는 $\gamma_{rol-1st}$ 와 γ_{app} 간의 차이가 발생하지만 그 이후에는 같은 크기이다. 첫 번째 구름접촉 이후 잔류변형률($\gamma_{postrol-1st}$)이 크게 발생하며, 두 번째 구름접촉 시에는 $\gamma_{postrol-1st}$ 의 영향으로 $\gamma_{rol-2nd}$ 의 값이 커지게 되므로 수명이 감소하게 된다.

따라서 표면 제거시 수명이 증가하는 원인은 Prerolling으로 발생된 잔류변형률이 제거됨에 따라 작아지기 때문이며, 일정량 제거 후 다시 수명이 감소하는 원인은 표면 제거 후 첫 번째 구름접촉에서 다시 잔류변형률($\gamma_{postrol-1st}$)이 생성되기 때문이다. 이를 간략히 표현하면 다음과

같다.

접촉하중이 가해질 경우의 전단변형률(γ_{rol})은 초기에 남아 있는 잔류변형률(γ_{res})과 잔류변형률이 없을 때의 하중작용에 따른 변형률(γ_{app})의 합으로 나타내며 식 (3-5)와 같다.

$$\gamma_{res} + \gamma_{app} = \gamma_{rol} \quad (3)$$

제거량(d)이 d_{max_pre} 보다 작을 경우에는 γ_{res} 의 영향으로 γ_{rol} 의 최대값($\gamma_{rol-max}$)이 γ_{app} 의 최대값($\gamma_{app-max}$)보다 커지며, 제거량이 증가함에 따라 γ_{res} 값이 작아지므로 $\gamma_{rol-max}$ 은 작아진다. 제

거량이 d_{max_pre} 와 같을 경우에는 γ_{res} 가 거의 없으므로 $\gamma_{rol-max}$ 와 $\gamma_{app-max}$ 는 거의 같아진다. 반면 제거량이 d_{max_pre} 보다 커질 경우에는 첫 번째 접촉시에는 γ_{res} 이 없기 때문에 $\gamma_{rol-max}$ 와 $\gamma_{app-max}$ 는 거의 같은 값이지만 γ_{res} 가 다시 발생하여 두 번째 접촉에서는 $\gamma_{app-max}$ 가 커지게 되므로 수명이 증가한다.

$$\gamma_{rol-max} \begin{cases} > \gamma_{app-max} & \text{if } d < d_{max_pre} \\ \approx \gamma_{app-max} & \text{if } d = d_{max_pre} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{if } d > d_{max_pre} \begin{cases} \approx \gamma_{app-max} & \text{at 1strolling} \\ > \gamma_{app-max} & \text{at 2ndrolling} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, γ_{res} : 잔류 변형률,
 γ_{app} : 잔류변형률이 없고 하중 작용시 변형률,
 γ_{rol} : 하중 작용시 변형률,
 $\gamma_{rol-max}$: γ_{rol} 의 최대값
 $\gamma_{app-max}$: γ_{app} 의 최대값

3. 초기 잔류응력의 효과

3.1 초기 잔류응력에 따른 표면제거깊이 결정

차륜은 Fig. 16에 나타낸것과 같이 제조시 형성된 압축잔류응력이 제동조건에 따라 인장응력으로 변화하며 Fig. 17과 같이 제동시 발생된 최대 온도와 표면 잔류응력은 선형적인 관계에 있다.⁽¹¹⁾ 이러한 잔류응력의 변화는 Fig. 18에 나타낸 것과 같이 전단변형률에 영향을 미친다.

전절에서 기술한 바와 같이 전단변형률이 최대가 되는 깊이까지를 제거할 경우, 최대수명을 확보할 수가 있다. 따라서 제동조건에 따른 전단변형률의 변화를 고려하여 최적제거깊이를 결정할 필요가 있다. 본 논문에서는 최적제거깊이의 결정을 위해서 표면에서의 잔류응력과 최대전단변형률 발생깊이를 Fig. 19와 같이 나타내고 이를 다음 식과 같이 선형관계로 정리하였다.

$$\frac{d}{a} = -0.30\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_y}\right) - 0.77 \quad (6)$$

여기서, σ_r : 표면 잔류응력,

σ_y : 항복강도
 d : 제거깊이
 a : 접촉면의 반경이다.

식 (4)에서 최적제거깊이(d)를 결정하려면 접촉면의 반경(a)를 계산하여야 한다. 접촉면의 반경에 관한 계산식은 다음과 같이 알려져 있다.^(12,13)

$$a = a^3 \sqrt{\frac{FS}{K}} \quad (7)$$

여기서, $S = \frac{4}{\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_w}}$, $K = \frac{4}{3} \left[\frac{E}{1-\nu^2} \right]$ 이며

a : R_w 과 R_r 에 따른 상수
 F : 차륜에 작용하는 하중
 R_r : 레일 정상부의 반경
 R_w : 차륜의 반경
 E : 탄성계수
 ν : 푸아송 비이다.

따라서 식 (4)와 (5)를 이용하면 최적제거깊이 d 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \left[-0.30\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_y}\right) - 0.77 \right] a^3 \sqrt{\frac{3F}{\left[\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_w} \right] \left[\frac{E}{1-\nu^2} \right]}} \quad (8)$$

4. 결 론

표면제거 깊이가 접촉피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유한요소 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면제거 깊이에 따라서 접촉피로수명은 증가하다가 적정 깊이 이상을 제거할 경우에는 수명이 다시 감소하며 이는 실험결과와 잘 일치하였다.
- (2) 표면 제거 깊이에 따른 수명증가 원인은 Prerolling시 발생한 잔류변형률에 의한 것이며 수명이 다시 감소하는 원인으로는 표면 제거 후 구름접촉시 다시 잔류변형률이 생성되었기 때문이다.
- (3) 초기잔류응력은 최대 전단변형률의 발생위치를 변화시키므로 최대 수명을 위한 적정 깊이 결정시 이를 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 철도유지보수시스템 기술연구(유지보수 성능향상 기술지원연구)과제의 일환으로 수

행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Cannon, D. F. and Pradier, H., 1996, "Rail Rolling Contact Fatigue Research by the European Rail Research Institute," *Wear* 191, pp. 1~13.
- (2) Bijak-Aochowski, M., 1997, "Residual Stress in Some Elasto-Plastic Problems of Rolling Contact with Friction," *International Journal of Mechanical Science*, 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," *Journal of Tribology*, Vol. 113, pp. 434~441.
- (4) Cretu, S. S. and Popinceanu, N. G., 1985, "The Influence of Residual Stress Induced by Plastic Deformation on Rolling Contact Fatigue," *Wear* 105, pp. 153~170.
- (5) Fukui, T. and Matsuda, K., 1985, "The Influence of Work Hardening on the Rolling Contact Fatigue Strength of the Strainless Steel," *Journal of Japan Society Lubrication Engineers*, Vol. 30, No. 11, pp. 811~815.
- (6) Ishida, M. and Abe, N., 1998, "The Effect of Preventive Grinding on Rail Surface Shellings," *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, Vol. 39, No. 3, pp. 136~141.
- (7) Steele, R. K., 1991, "The Effect Metal Removal, Steel Cleanliness and Wheel Load on the Fatigue Life of Rail," *Wear* 144, pp. 71~87.
- (8) Lee, R. T. and Chiou, Y. C., 1998, "Effects of Pre-Rolling and Metal Removal on the Fatigue Life of Lubricated Rolling/Sliding Contact," *Wear* 217, pp. 95~103.
- (9) Jones, C. P., Tyfour, W. R., Beynon, J.H. and Kapoor, A., 1997, "The Effect of Strain Hardening on Shakedown Limits of a Pearlitic Rail Steel," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 211 Part F.
- (10) Wang, C.H. and Liu, Q., 2002, "Predictive Models for Small Fatigue Cracks Growing Through Residual Stress Fields," *6th joint FAA/DoD/Nasa conference on aging aircraft*.
- (11) Seo, J. W., Goo, B. C., Choi, J. B. and Kim, Y. J., 2004, "A Study on the Contact Fatigue Life Evaluation for Railway Wheels Considering Residual Stress Variation," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 9, pp. 1391~1398.
- (12) Kamaku, 1980, "Rail," *Japan Railway Civil Engineering Association*, pp. 126~131.
- (13) Lee, J. H., Yang, W. H., Cho, M. R. and Sung, K. D., 1999, "A Study on the Shape Optimization of S-Shape Wheel for Rolling Stock," *Transactions of the KSME A*, Vol. 23, No. 12, pp. 2260~2266.