

차륜/레일 접촉에 의한 차륜의 잔류응력 평가

Evaluation of Residual Stress of railway wheel by rolling contact

서정원¹ 구병춘¹ 정홍채²

Jung-won Seo, Byenug-Choon Goo, Heung-chai Chung

Keywords : Railway wheels(철도차량 차륜), Residual stress (잔류응력), Contact stress (접촉응력)

Abstract

A wheel and axle failure can cause a derailment with its attendant loss of life and property. The service conditions of railway vehicles have become severe in recent years due to a general increase in operating speeds. Damages of railway wheel are a spalling by wheel/rail contact and thermal crack by braking heat etc. One of the main source of damage is a residual stress. therefore it is important to evaluate exactly.

A Residual stress of wheel is formed at the process of heat treatment when manufacturing. it is changed by contact stress developed by wheel/rail contact. Distributions of residual stress vary according to a magnitude of wheel load, a magnitude of friction when acceleration and deceleration. The objective of this paper is to estimate the influence of wheel motion on the residual stress distribution in the vicinity of the running surface.

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.

차륜에 발생하는 하중조건으로는 Fig. 1과 같이 차량의 무게에 의한 수직하중과 곡선통과시 발생하는 수평하중, 차량의 가속시와 감속시 발생하는 접선력, 답면제동을 사용하는 차량의 경우에는 브레이크 열에 의한 열응력이 발생한다. 또한 차량의 주행에 의해 동적인 하중이 작용하며 차륜은 이러한 과도한 하중을 견디어야 한다. 이러한 하중들 중에 수직력, 수평력 및 접선력은 차륜과 레일의 접촉에 의하여 차륜에 전달되고 이로 인하여 소성변형이 발생하고 잔류응력

이 발생한다. 잔류응력은 차륜의 강도와 수명에 미치는 중요한 인자이며 압축잔류응력의 경우에는 균열발생을 억제하고 인장잔류응력은 균열발생을 용이하도록 한다. 그러므로 차륜의 제조시에 차륜의 접촉면에 열처리를 하여 압축잔류응력을 생성시키고 있다.[1-2] 차륜의 접촉면에 발생하는 손상으로는 크게 마모와 접촉면의 균열이 발생하거나, 이로부터 일부가 떨어져 나가는 박리 등으로 구분할 수 있다. 접촉면에 발생하는 균열은 운행중에 급작스런 파손을 가져올 수 있고 박리와 같은 표면손상은 차륜과 레일에 충격을 하중을 유발시켜 레일과 차량의 수명을 단축시킨다. 이러한 접촉면 손상은 잔류응력이 주요한 인자이며 차륜의 손상원인을 파악하기 위하여는 이것이 정확히 파악되어야 한다.

Bhargava[3][4] 등은 첫 번째 접촉과 반복적인 순수 구름접촉 시 탄.소성 F.E.M. 해석을 수행하여 접촉면의 잔류응력을 평가하였고, Kulkarni[5] 등은 3차원

F.E.M. 모델에 대하여 순수 구름접촉과 높은 하중 (shakedown limit load)이 작용할 시 잔류응력을 평가하였다. Jiang[6]등은 구름접촉에 대하여 해석적인 방법을 제시하여 기존의 알루미늄 합금에 대한 결과와 비교하였다. MARECK[7]등은 구름접촉시 마찰력의 변화에 의한 잔류응력 평가에 대하여 지금까지 타 연구자에 대한 해석결과가 서로 다를 수 있음을 지적하였다. 지금까지 연구결과 순수구름 접촉에 대한 잔류응력의 평가는 많이 수행되었으나 가.감속 시 마찰력을 고려한 잔류응력의 평가에 대하여는 미비한 실정이다. 본 논문에서는 철도차량의 차륜/레일의 접촉 시 발생하는 접촉조건인 순수 구름접촉 및 반복하중에 의한 잔류응력의 변화를 평가하였다. 특히 가.감속시 발생하는 견인력, 제동력에 의한 접촉면의 마찰계수 변화에 따른 잔류응력을 자세히 평가하였다.

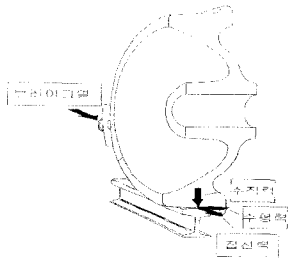


Fig. 1 차륜에 발생하는 하중조건

2. 해석모델

2.1 해석모델 및 조건

하중의 변화에 의한 잔류응력의 변화를 살펴보기 위하여 그림과 같이 2차원으로 단순화된 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 휠/레일 접촉에 의한 접촉은 4mm로 하였고 이는 운중의 9ton에 해당하는 것으로 하중의 분포는 Hertzian 분포로 ($p = p_0(1 - x^2/a^2)^{0.5}$, p_0 : 최대접촉하중, a : 접촉면 직경)가정하여 하중을 주었다.

탄소성 해석을 수행하였고 항복조건은 Von-Mises, Kinematic Hardening Rule를 사용하였다. 휠의 이동을 모사하기 위하여 하중을 이동시켜가면서 해석을 하였고 마지막으로 하중을 제거하여 잔류응력의 분포를 살펴보았다. 최대 Hertzian 하중은 1160MPa이고 항복강도는 500MPa, 전단항복강도(Shearing yield

strength, k)는 289MPa로 하였다($p/k=4.0$). 접촉표면의 급격한 응력의 변화를 살펴보기 위하여 요소크기는 길이방향은 0.015a, 깊이방향은 0.06a로 하였다.

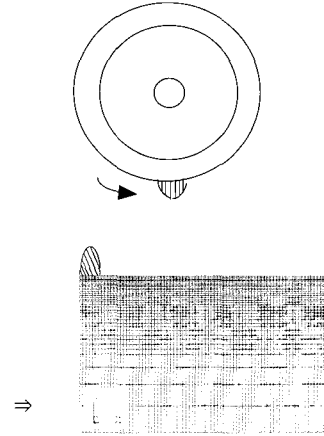


Fig. 2 해석 모델

2.2 해석모델의 검증

해석모델의 검증을 위하여 모델의 중앙지점에 하중을 주고 Hertzian의 이론식과 비교하였다. 탄성접촉시 접촉면 내부의 응력분포는 다음의 식으로 표현된다.[8]

$$\sigma_x = -\frac{p_0}{a} [(a^2 + 2y^2)(a^2 + y^2)^{-1/2} - 2y] \quad (1)$$

$$\sigma_y = -p_0 a (a^2 + y^2)^{-1/2} \quad (2)$$

$$\tau_1 = -p_0 a [y - y^2(a^2 + y^2)^{-1/2}] \quad (3)$$

$y=0.78 a$ 에서 $(\tau_1)_{max} = 0.3 p_0$ 이다.

여기서, σ_x, σ_y : x 및 y 방향응력, τ_1 : 주 전단응력, p_0 : 최대접촉하중, a : 접촉면 직경, y : 접촉면에서의 깊이 방향이다.

Fig. 3은 주 전단응력(principle shear stress)의 분포를 나타내고 있으며 최대응력은 이론식에와 같이 표면에서 발생하였고, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다. Hertzian이론에 따른 접촉면아래에서의 응력분포중 최대 주 전단응력은 0.78 a에서 나타나고 크기는 0.3 p_0 로써 이론해와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 5는 최대 전단응력이 발생한 깊이인 0.5a 에서의 응력분포를 나타내고 있다. 접촉면에서 떨어진 부분은 응력이 발생하지 않았고 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 모두 압축응력이 발생하였고 σ_{xy} 는 중심에 앞부분은 인장응력이 발생하였고 뒷부분은 압축응력이 발생하고 있다. Fig. 6

은 마찰력의 유·무에 따른 깊이 방향에 따른 전단응력의 분포를 나타내고 있으며 그림과 같이 마찰력이 없는 경우에는 최대 응력이 발생한 깊이가 3mm 부근이었으나, 마찰력이 있는 경우에는 1.8mm 부근에서 최대 응력이 발생하였다. 또한 최대응력의 크기 역시 마찰력이 없는 경우에는 380MPa, 마찰력이 있는 경우에는 420MPa로 최대응력의 크기 역시 증가하였다. 따라서 마찰력의 유·무에 따라 응력분포가 크게 변화함을 알 수 있고 이에 따라 잔류응력 또한 다르게 분포된다.

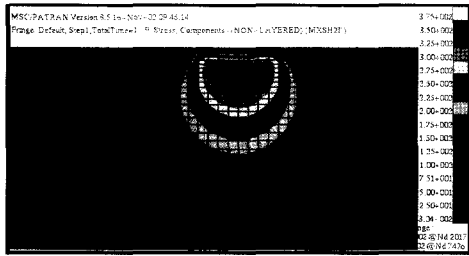


Fig. 3 Max shear stress 분포

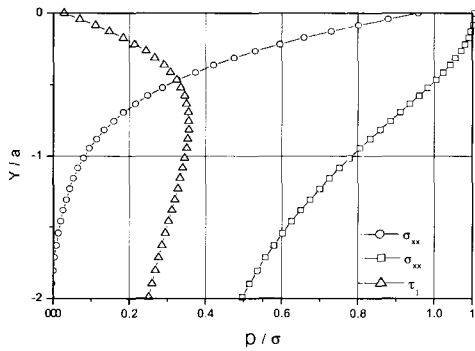


Fig. 4 깊이방향에 따른 응력 분포

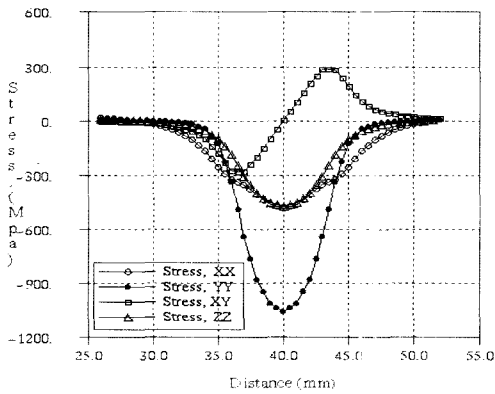


Fig. 5 길이방향 응력 분포(0.5a)

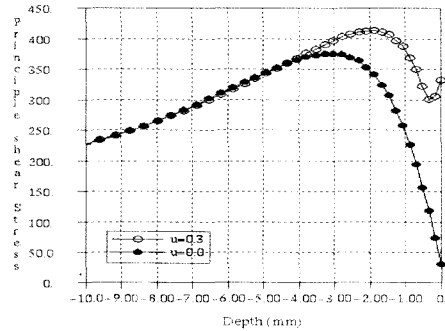


Fig. 6 마찰력 유무에 따른 주 전단응력 분포

3. 차륜/레일 접촉에 의한 잔류응력 분포

3.1 순수구름에 의한 잔류응력 분포

차륜에 작용하는 하중은 순수한 구름접촉과, 가감속시의 하중으로 구분할 수 있다. 본 절에서는 마찰력이 없는 순수한 구름접촉시의 영향을 살펴보았다. Fig. 7(a)는 첫 번째 하중이 부과된 후의 등가응력 분포를 나타내고 있으며 Fig. 7(b)는 20번째 하중의 부과 후 등가응력의 분포를 나타내고 있으며 하중의 부가는 총 74번을 수행하였다. 그림에서와 같이 항복은 표면 밑에서 발생하고 있음을 알 수 있으며 등가응력은 그전의 하중에 의한 항복발생 후 잔류응력의 영향으로 하중부가점을 중심으로 좌우 비대칭이다.

Fig. 7(c)는 하중이 처음부터 끝까지 순서대로 부과된 후 마지막으로 하중이 제거된 상태에서의 잔류응력을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 항복이 발생한 부위인 표면밑에서 잔류응력이 생성되었으며 처음과 마지막을 제외한 부위에서 일정한 분포를 하고 있다. 처음과 마지막에서의 잔류응력의 변화가 다른 이유는 구속조건의 영향으로 다르게 발생하였다.

잔류응력 분포는 평면 변형률 조건이므로 τ_{xz}, τ_{zy} 는 zero이고 다른 응력은 z에 독립이다. 소성변형이 하중의 이동에 따라 x 방향으로 계속해서 발생하므로 x에도 독립이다. 따라서 잔류응력 분포는 x방향에 따라서는 일정하며 깊이방향(y)의 함수이다. 마찰력에 의한 수평력이 없는 상태(Traction free surface) 이므로 σ_{yy}, τ_{xy} 는 존재하지 않는다. 따라서 잔류응력은 다음과 같은 성분만 남는다.[8]

$$\sigma_x = f_1(y), \quad \sigma_z = f_2(y) \quad (4)$$

$$\sigma_y = \tau_{xz} = \tau_{yz} = \tau_{xy} = 0 \quad (5)$$

Fig. 8은 깊이가 0.5 a 지점에서의 길이에 따른 응력 분포를 나타내고 있다. 그림과 같이 σ_{xx} , σ_{zz} 는 하중이 통과한 부분에는 잔류응력이 발생하고 있음을 보여주고 있으며 σ_{xy} 는 탄성해석과 유사한 결과를 보여주고 있다. Fig. 9는 깊이방향으로의 잔류응력 분포를 나타내고 있으며, 이는 x, z 방향에서 발생하며 표면에서는 0에 가깝고 깊이 방향에 따라 압축잔류응력으로 바뀌고 있다. 최대 압축잔류응력이 발생한 깊이는 2.5 mm 부근이다.

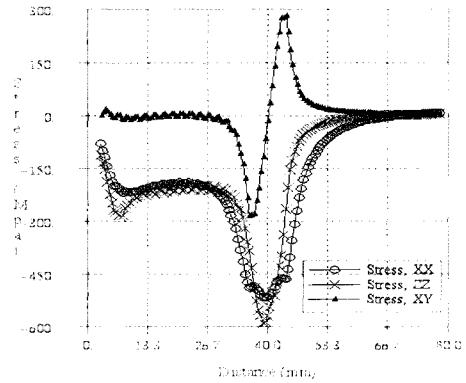
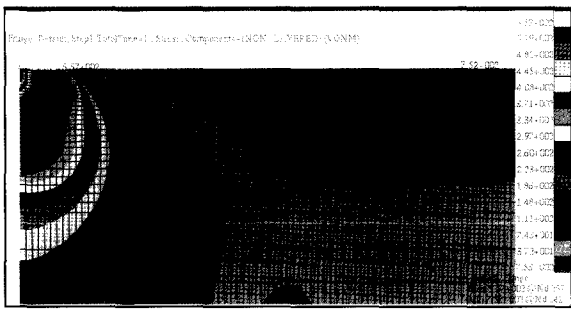
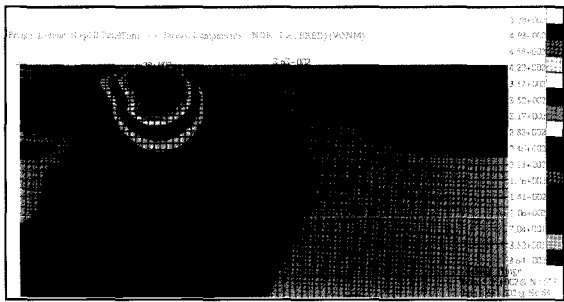


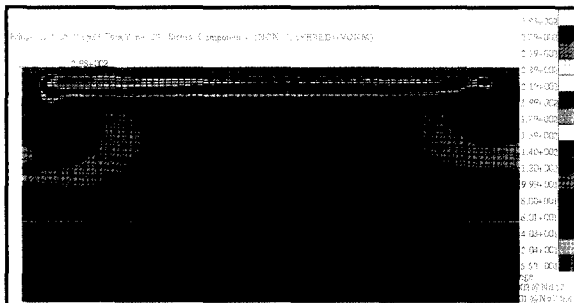
Fig. 8 하중 중간지점 통과시 응력 분포 (깊이 0.5a)



a) 1번째 하중부가 해석 모델



b) 20번째 하중 부가



c) 하중제거후 잔류응력분포
Fig. 7 주행시 응력분포

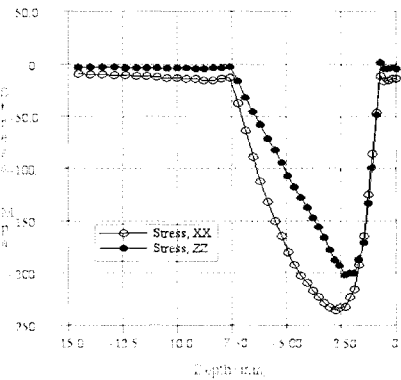


Fig. 9 잔류응력 분포

3.2 반복하중에 의한 잔류응력 분포

철도차량의 차륜/레일은 반복적인 접촉하중을 견디어야 한다. 첫 번째 하중 부가 후 발생된 응력이 탄성 한도를 넘어서면 소성변형이 발생하며 잔류응력이 생성된다. 첫 번째 하중이 통과 후 두 번째 하중이 통과시 차륜/레일은 첫 번째 하중에 의해 생성된 잔류응력과 접촉하중을 받게된다. 수 차례 통과 후에는 전체적으로 탄성변형을 하게되며 이러한 과정을 반복 하중하에 shakedown과정이라 하며 그림으로 나타내면 Fig. 10과 같다. [9]

잔류응력이 시간에 독립적이고 변화하지 않으면 시스템은 탄성한도로 구성이 되고 shakedown이 발생하고, 만일 이러한 잔류응력 분포가 발견되지 않으면 하중의 통과시 지속적인 소성변형이 발생하는 것이다. 접촉과 잔류응력을 고려하여 주응력은 다음과 같이 계산된다. [8]

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} [\sigma_x + \sigma_{xr} + \sigma_y] + \frac{1}{2} [[\sigma_x + \sigma_{xr} - \sigma_y]^2 + 4\tau_{xy}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} [\sigma_x + \sigma_{xr} + \sigma_y] - \frac{1}{2} [[\sigma_x + \sigma_{xr} - \sigma_y]^2 + 4\tau_{xy}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \nu [\sigma_x + \sigma_{xr} + \sigma_y] + \sigma_{zr} \quad (8)$$

여기서 $\sigma_{1,2,3}$: 주응력, σ_{xr} : x방향 잔류응력, σ_{zr} : z 방향 잔류응력이다. Tresca 항복조건에 따른 다음 식을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{4} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 \leq k^2 \quad (9)$$

$$\frac{1}{4} [\sigma_x + \sigma_{xr} - \sigma_y]^2 + \tau_{xy}^2 \leq k^2 \quad (10)$$

여기서 k : 순수전단 항복응력이다.

만일 $\sigma_{xr} = \sigma_z - \sigma_x$ 일 경우 τ_{xy} 의 최대값이 k에 도달할 경우에 shakedown이 발생한다. 최대 τ_{xy} 의 값은 $0.25 p_0$ 이고 (위치는 $\pm 0.87a, 0.50a$)이므로 shakedown은 다음일 경우에 발생한다.

$$p_0 \leq 4.0k \quad (11)$$

Fig. 11은 $p/k=3, 4, 5$ 일 경우의 3mm 부근에서의 $\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 의 변화를 나타내고 있다. a)는 그림과 같이 소성이 거의 발생하지 않았기 때문에 탄성적으로 변화함을 알 수 있다. b)는 $p_0/k=4$ 일 경우로 그림과 같이 첫 번째 하중이 통과할 경우에는 항복이 발생하였고 두 번째 하중 이후에는 탄성적으로 거동을 함을 알 수 있다. 따라서 $p_0/k=4$ 일 경우에는 Elastic shakedown이 발생 함을 알 수 있다. $p_0/k=5$ 일 경우 shakedown 한계를 넘어섰기 때문에 반복하중에 의하여 지속적으로 변형률이 변화함을 알 수 있다. Fig. 12는 $p_0/k=5$ 일 경우의 잔류 변형률의 변화를 나타내고 있으며 그림과 같이 하중의 통과가 증가할수록 점점 커짐을 알 수 있다. Fig. 13은 $p_0/k=5$ 일 경우의 σ_{xx} 와 σ_{zz} 의 변화를 나타내고 있다. σ_{xx} 의 경우에는 하중이 통과함에 따라 잔류응력이 더 작아짐을 알 수있고 σ_{zz} 의 경우에는 거의 변화가 없었다.

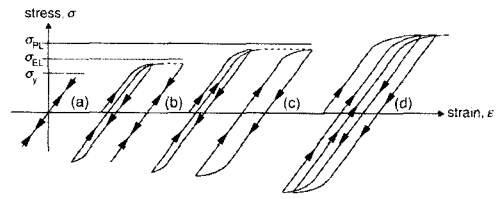
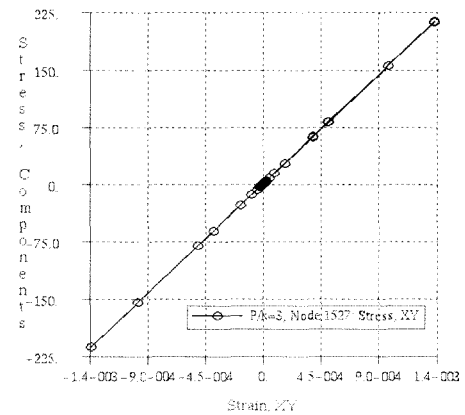
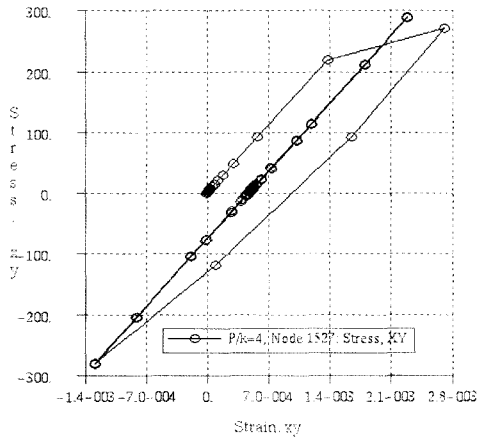


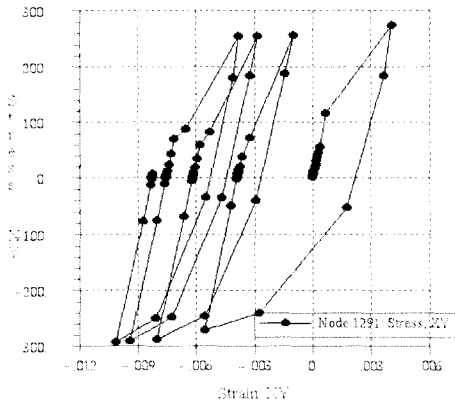
Fig. 10 사이클 하중에 의한 재료의 응답
a) Perfectly elastic b) elastic shakedown
c) plastic shakedown d) ratchetting



a) $p_0/k = 3$



b) $p_0/k = 4$



c) $p_0/k=5$

Fig. 11 깊이 3mm 부근의 Stress-Strain 변화

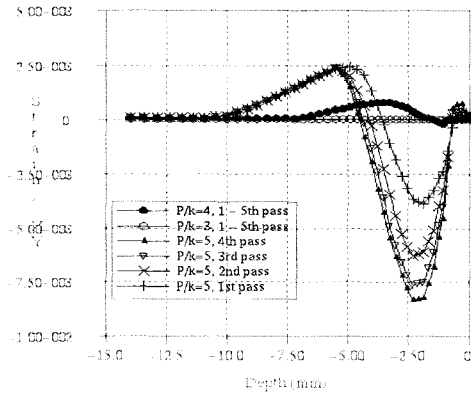


Fig. 12 잔류 스트레인의 변화

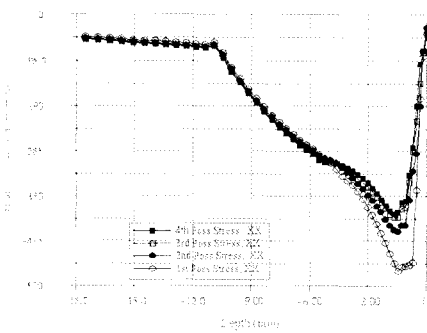


Fig. 13 $p_0/k=5$ 일경우의 잔류응력의 변화 (σ_{xx})

3.3 가.감속시 잔류응력의 변화

차륜/레일의 경우 순수한 구름접촉에 의한 하중도 발생하지만, 차량의 가속시나 제동에 의한 감속시 수직 하중 뿐만 아니라 마찰력에 의한 접선력이 작용하게

된다. 본 해석에서는 $p_0/k = 4$ 일 경우에서, 접선력은 부분적인 미끄러짐이 없이 마찰력에 의해 모두 접선력으로 바뀐다고 가정하여 마찰력의 크기에 따른 잔류응력의 변화를 살펴보았다. Fig. 14는 하중조건을 나타내고 있다.[6]

Fig. 15(a)는 제동시 접촉에 의한 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 순수 구름접촉에서는 표면에서는 잔류응력이 발생하지 않고 깊이에 따라서 압축잔류응력을 형성하고 있으나 마찰계수가 증가함에 따라 최대 응력의 발생위치가 표면으로 가까워지고 -0.2 이상에서는 표면에 압축잔류응력이 발생하였다. Fig. 15(b)는 가속시의 경우로써 마찰계수가 0.2 이하에서는 표면에 인장잔류응력이 발생하고 0.3 이상에서는 압축잔류응력으로 바뀌고 있다. 이와같이 마찰계수의 크기에 따라서 표면의 잔류응력은 크게 변화함을 알 수 있다.

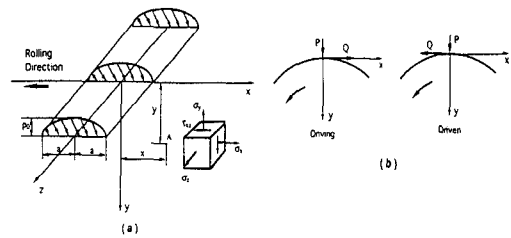
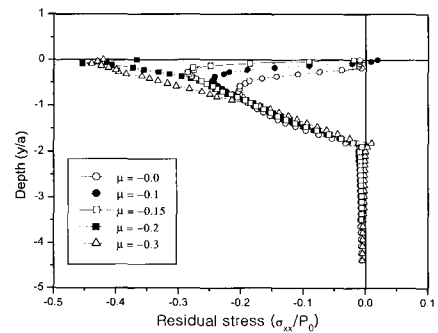
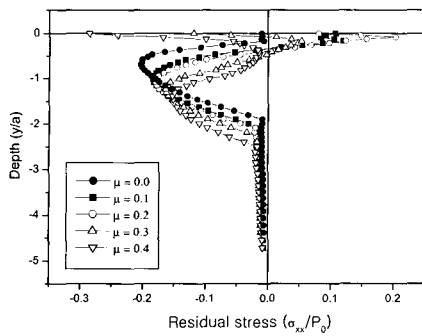


Fig. 14 가속시와 제동시 하중조건



a) 제동시

참고문헌



b) 가속시

Fig. 15 제동시 마찰계수 변화에 따른 σ_{xx} 의 변화

4. 결론

차륜과 레일의 접촉에 의한 잔류응력의 변화를 살펴보기 위하여 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 순수한 구름에 의한 잔류응력은 표면에서 발생하지 않았고 깊이에 따라서 압축이 발생하였다. 최대 잔류응력은 $y/a=0.6$ 부근에서 발생하였고 하중이 커짐에 따라서 크게 발생하였다.
- 2) 반복적인 접촉에 의한 잔류응력의 변화는 하중의 크기에 따라서 변화하며, $p/k=4$ 이하 일 경우에는 shakedown이 발생하여 재료가 탄성적인 거동을 보인다.
- 3) 제동시에는 마찰계수가 증가함에 따라 최대 응력의 발생위치가 표면으로 가까워지고 -0.2 이상에서는 표면에 압축잔류응력이 발생하였고. 가속시의 경우로써 마찰계수가 0.2 이하에서는 표면에 인장잔류응력이 발생하고 0.3이상에서는 압축잔류응력으로 바뀌어 마찰계수의 크기에 따라서 표면의 잔류응력은 크게 변화함을 알 수 있었다.

- (1) G.J.Mayer, D.H.Stone, 1991,"An analysis of the thermal contributions to railway wheel shelling", wear144, pp117 - 138
- (2) Johan Ahlstrom, 1999 "Microstructural evaluation and interpretation of the mechanically and thermally affected zone under railway wheel flats", wear 232, pp. 1 -14
- (3) V. Bhagava, G.T. Hahn, C.A. Rubin, 1985," An Elastic-Plastic Finite Element Model of Rolling Contact, Part 1 : Analysis of single contacts", Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, pp 67 - 74
- (4) V. Bhagava, G.T. Hahn, C.A. Rubin, 1985," An Elastic-Plastic Finite Element Model of Rolling Contact, Part 2 : Analysis of Repeated contacts", Journal of Applied Mechanics, pp 1 - 8
- (5) S.M. Kulkarni, G.T. Hahn, 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.
- (6) Yanyao Jiang, H. Sehitoglu, 1994, "An Analytical Approach to Elastic-Plastic Stress Analysis of Rolling Contact", Journal of Tribology Vol. 116, pp 557 - 587
- (7) Mareck Bijak-Zochowski, P. Marek, 1997, "Residual stress in some elasto-plastic problems of rolling contact with friction", Int. J. Mech. Sci. Vol. 39, No. 1, pp. 15 - 32
- (8) K.L. Johnson, 1985, "Contact mechanics", Cambridge University Press, pp. 99-104
- (9) J.W. Ringsberg, H. Bjarnehed, 2000, " Rolling contact fatigue of rails - Finite element modelling of residual stress, strains and crack initiation", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 214 Part F, pp 7 - 19