철도차량 차륜의 잔류응력 평가
Evaluation of Residual Stress of railway wheel

서정원*, 구병춘*, 이동형*, 정흥채*
Seo, Jung-Won, Goo, Byeung-Choon, Lee, Dong-Hyeong, Chung Heung-Chai

ABSTRACT : Railway wheel and axle are the most critical components in railway system. 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. Therefore, more precise evaluation of wheelset strength and safety has been desired. 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 and thermal stress from heat induced in braking. The objective of this paper is to estimate the variation and magnitude of the residual stress of railway wheel.

1. 서 론

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 손상요인은 휠레일의 접촉응력에 의한 Spalling, 제동열에 의한 열크랙 등이 있으며 이러한 손상은 잔류응력이 주요인자로 작용하고 있다.[1] 또한 차륜 답면의 잔류응력은 운행시 제동열에 의해 잔류응력의 분포가 변화한다고 알려져 있다.[2][3][4] 국내의 경우에는 현재 화차 등에는 답면제동을 사용하고 있으며 이로인하여 균열이 발생한다고 알려져 있으며[5] Fig. 1은 균열이 발생한 차륜을 보여주고있다. 제동은 반복적인 열응력을 생성하여 이것은 열피로과정과 차륜답면의 잔류응력을 변화시키므로 이를 고려한 피로수명평가에 관한 연구가 수행되어 왔다.[6] 따라서 차륜의 손상원인과 과정을 평가하기 위하여는 차륜에 발생하는 잔류응력의 평가가 중요하다. 본 논문에서는 차륜의 발생하는 잔류응력을 평가하기 위하여 제조공정시 열처리에 의한 잔류응력과 제동에 의한 열응력으로 인한 잔류응력의 변화 그리고 휠/레일 접촉에 의한 잔류응력의 변화를 평가하였다.

2. 제조시 열처리에 의한 잔류응력

2.1 열처리조건

철도차량 차륜의 경우 차륜 답면의 압축잔류응력을 생성시키기 위하여 Fig. 2과 같은 열처리 과정을 거친다. 그림에서와 같이 압연 후 공냉을 실시하고 차륜답면부에 수냉을 실시하고 다시 뜨임 처리를 한다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

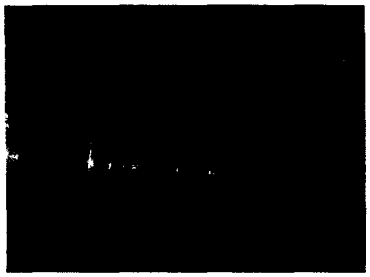

Fig. 1 철도차량 차륜에 발생한 균열

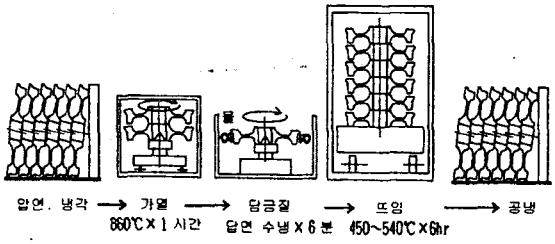

Fig. 2 열처리 조건

2.2 해석모델 및 물성치

해석대상으로는 현재 국내에서 사용하는 객화차용(SSW1) 차륜을 대상으로 하였으며 해석모델 및 하중의 대칭성을 이용하여 축대칭 모델을 사용하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 모델을 나타내고 있다.

해석은 온도에 따른 탄소성 해석을 수행하여야 하므로 Table은 온도에 따른 물성치를 나타내고 있다. 탄소성해석 조건으로는 Perfect Plastic 조건을 사용하였다. 해석은 열전달 해석을 수행후 이로부터 열응력 해석을 수행하였다.

Table 1 열전달 해석 물성치

Temperature (℃)	E (MPa)	Thermal Conductivity (W/m ℃)	Coefficient of thermal expansion (X10-5/℃)	Yield Strength (Mpa)
24	213	0.295	1.0	490
230	201	0.307	1.15	424
358	193	0.314	1.24	366
452	172	0.320	1.30	291
567	102	0.326	1.37	132
704	50	0.334	1.30	39
900	43	0.345	1.40	11

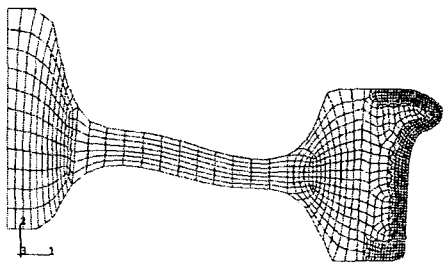

Fig. 3 해석 모델

2.3 열처리조건에 따른 잔류응력 변화

철도차량 차륜은 열처리 조건에 따라서 잔류응력의 변화가 생긴다고 알려져 있으므로 공냉시 온도유지시간 및 냉각시 열전달 계수에 따라서 잔류응력의 변화를 살펴보았다.

Fig. 4는 이에 따른 열응력 해석결과를 나타내고 있으며 그림과 같이 최종적으로는 차륜 답면에 압축잔류응력이 발생하였다.

Fig. 5는 차륜 답면 중앙에서의 깊이 방향으로 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 실제 제조공정시에 잔류응력은 표면에서 최대 -370Mpa이 발생하였고 깊이 방향에 따라 점차적으로 인장잔류응력으로 변화하였다. 인장에서 압축으로 변화하는 깊이는 35 mm 이다. 그래프의 ME1-ME6은 유지시간 및 냉각조건을 바꾸어 가면서 해석을 수행한 결과로써 전반적인 경향은 유사하지만 최대 잔류응력의 크기가 변화하였으며 현재조건이 가장 큰 잔류응력을 형성하였다.

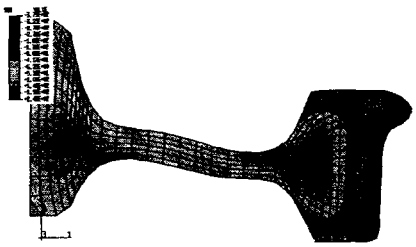

Fig. 4 열응력 해석결과

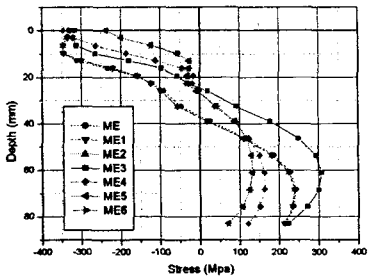

Fig. 5 열처리 조건에 따른 잔류응력의 변화

3. 제동시 잔류응력

3.1 제동 다이나모 실험

제동조건에 따른 잔류응력의 변화를 살펴보기위하여 해석을 수행하기 위하여는 해석 입력조건을 설정하여야 한다. 따라서 제동다이나모 실험을 통하여 해석 입력조건을 설정하고 해석모델을 검증하기 위하여 제동시 온도을 측정하였다. Fig. 6은 제동시험시 측정한 속도, 압부력 및 온도 측정결과로서 제동조건은 비상제동 조건이다. 그림에서와 같이 속도는 제동 시점에서 선형적으로 감속하고 압부력은 압력이 가해지는 시간인 3.5초후에 일정한 값을 가진다. 온도는 표면밑 5mm에서 측정결과로서 최고 240℃까지 발생하였다.

Fig. 7은 마찰계수와 측정된 값으로부터 계산된 열유입량을 나타내고 있다. 마찰계수 값은 속도에 따라서 변화를 하고 있으며 평균 0.2 이다. 제동시 발생된 열량은 전부 차륜으로 유입되는 것이 일부는 마찰재로 유입된다. 유입되는 열량의 비는 아래의 식으로 계산 할 수 있으며 여기서는 89%가 차륜으로 유입된다.

$$\text{- Heat Flux (w/m}^2\text{)} = \frac{\beta \mu P V}{A} \quad (1)$$

$$\text{- 열분담율 } \beta = \left(1 + \frac{A_2(K_2\rho_2C_2)^{0.5}}{A_1(K_1\rho_1C_1)^{0.5}}\right)^{-1} \quad (2)$$

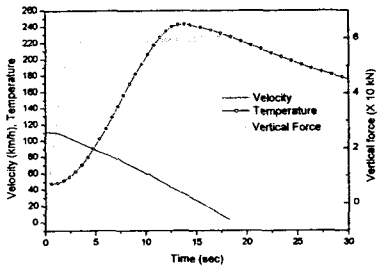

Fig. 6 속도, 압부력, 온도 측정결과

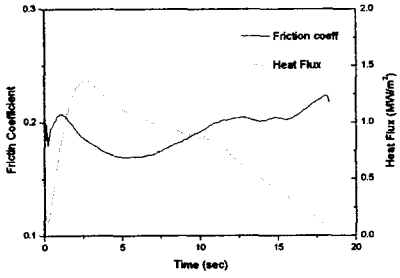

Fig. 7 마찰계수 및 제동열량

3.2 잔류응력 해석

제동 다이나모 실험결과를 입력조건으로 열응력을 해석을 수행하였으며 초기조건으로는 제조시 발생된 잔류응력을 주었다.

Fig. 8 - 9는 제동전후의 잔류응력의 변화를 나타내고 있으며 그림과 같이 제동후에는 열량이 유입되는 부분에서 인장잔류응력이 생성되었다.

Fig. 10은 모델을 검증하기위하여 제동시간에 따른 온도변화를 나타내고 있으며 그림과 같이 실험과 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있으며 측정결과는 표면밑 5mm에서의 온도변화이다. 차륜 답면 표면에서의 온도는 이보다 높은 285℃까지 발생하였다.

Fig. 11은 제동 전후의 잔류응력의 변화를 차륜 답면에서 깊이방향으로 나타낸 것으로 그림에서와 같이 잔류응력은 제동후 인장잔류응력으로 변화하며 변화되는 깊이는 15mm 근처까지 변화가 있으며

그 이후 깊이에서는 전반적인 경향과 크기는 유사하였다.

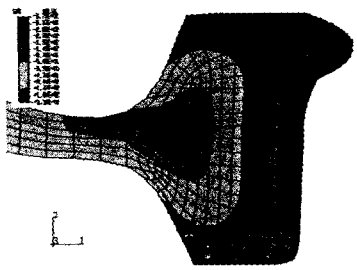

Fig. 8 제조시 열처리에 의한 잔류응력

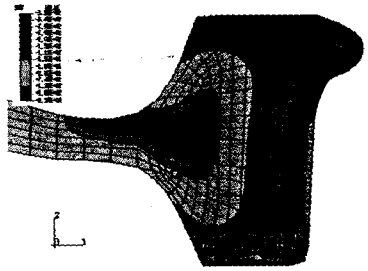

Fig. 9 제동후 잔류응력의 변화

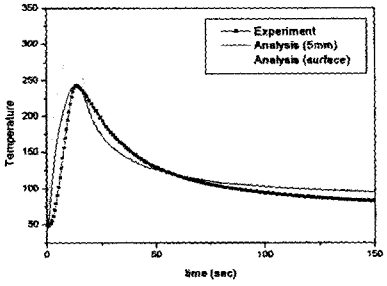

Fig. 10 실험과 해석의 온도변화 비교

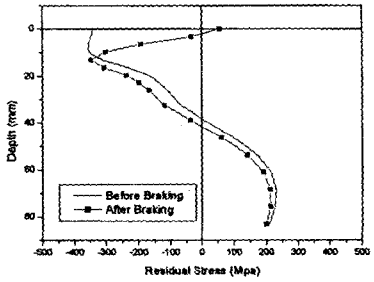

Fig. 11 제동전후의 잔류응력의 변화

3.3 제동시간의 변화에 따른 잔류응력

철도차량의 경우 열차편성의 수에 따라 동일한 압부력을 갖더라도 제동시간의 차이를 보이게 되므로 압부력을 일정하게 유지하고 제동시간에 따른 잔류응력의 변화를 살펴 보았다. Fig. 12는 해석조건에 따른 잔류응력의 변화를 나타내고 있으며 이것 역시 제동시간이 길어짐에 따라 잔류응력이 압축에서 인장으로 변화함을 알 수 있다. 전절에서와 다른 점은 잔류응력의 변화하는 깊이가 변화하는 것을 알 수 있으며 최대 25mm 부근에서 잔류응력이 변화함을 알 수 있다.

Fig. 13은 제동시 발생하는 최고온도에 따른 잔류응력의 변화를 나타내고 있으며 최고온도가 150℃ 부근까지는 잔류응력의 변화가 발생하지 않고 있으며 그 이후에서는 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 제동전에 압축잔류응력이 약 -370MPa이므로 최고 온도가 약 300℃에서는 압축잔류응력이 인장잔류응력으로 바뀐다. 인장잔류응력의 깊이는 300℃에서 2mm이고 400℃에서 10mm로 급격히 변화하였다.

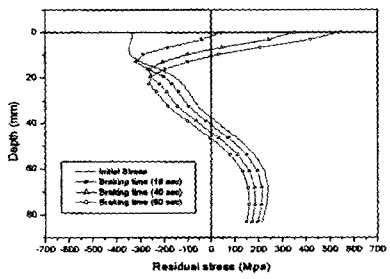

Fig. 12 제동시간 변화에 따른 잔류응력의 변화

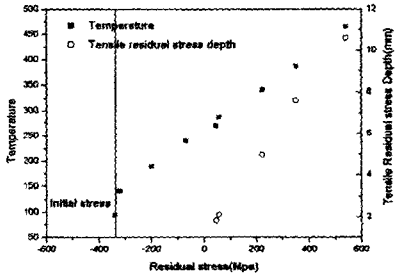

Fig. 13 최고온도에 따른 잔류응력 변화

4. 휠/레일 접촉에 의한 잔류응력 변화

4.1 해석모델

휠/레일은 그림과 같이 반복적인 접촉이 발생하며 이로 인하여 잔류응력의 변화가 발생한다. 또한 휠/레일은 가속, 감속시에는 하중의 분포가 달라지므로 잔류응력 역시 변화한다. 따라서 이러한 하중의 변화에 의한 잔류응력의 변화를 살펴보기 위하여 그림과 같이 단순화된 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 휠/레일 접촉에 의한 접촉은 4mm로 하였고 이는 윤중의 9ton에 해당하는 것으로 하중의 분포는 Hertizian 분포로($p=p_0(1-x^2/a^2)^{0.5}$ 가정하여 하중을 주었다. 탄소성 해석을 수행하였고 항복조건은 Von-Mises, Kinematic Hardening Rule를 사용하였다. 휠의 이동을 모사하기 위하여 하중을 이동시켜가면서 해석을 하였고 마지막으로는 하중을 제거하여 잔류응력의 분포를 살펴보았다. 최대 Hertz pressure는 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.

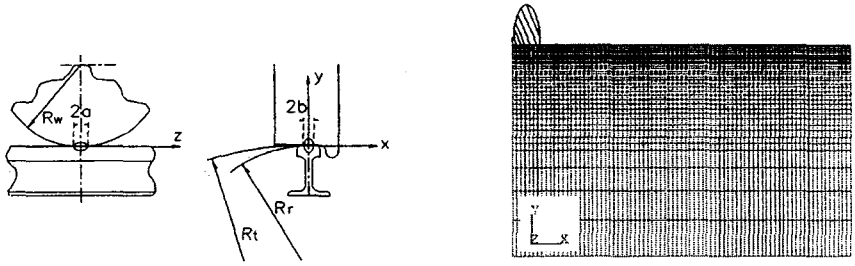

Fig. 14 해석 모델

4.2 해석결과

해석시 하중은조건으로는 순수한 구름접촉에 의한 하중과, 가감속시의 하중을 부가하여 영향을 살펴보았다. Fig. 15는 첫 번째 하중이 부과된 후의 등가응력 분포를 나타내고 있으며 Fig. 16은 20번째 하중의 부과후 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. 17은 하중이 처음부터 끝까지 순서대로 부가된 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.

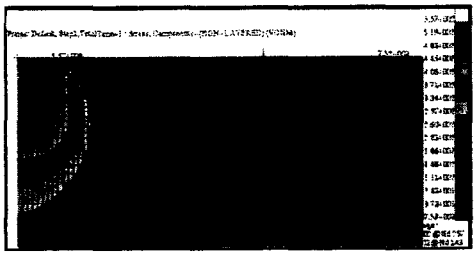

Fig. 15 1번째 하중부가 해석 모델

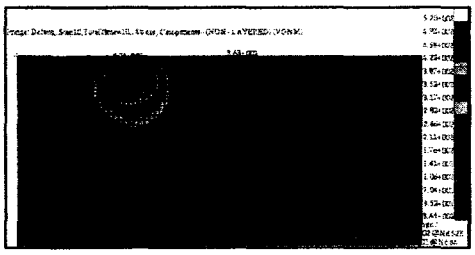

Fig. 16 20번째 하중 부가

Fig. 18은 하중종류, 순수 구름접촉, 감속시 접촉, 제동시 접촉에 의한 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 순수 구름접촉에서는 표면에서는 잔류응력이 발생하지 않고 깊이에 따라서 압축잔류응력을 형성하고 있으며 y/a=2이상에서는 잔류응력이 발생하지 않았다. 그림에서 가감속시의 잔류응력은 y/a=1 이하에서 많은 변화가 발생함을 알 수 있다.

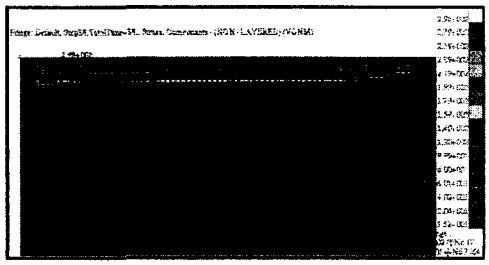

Fig. 17 하중 제거후 잔류응력 분포

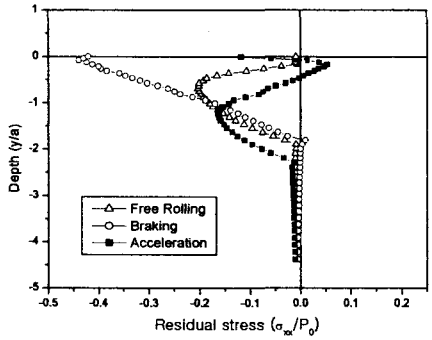

Fig. 18 하중 종류에 따른 잔류응력 분포

4. 결 론

1) 제조시 열처리에 의해 차륜 답면에 압축잔류응력이 발생하며 크기는 열처리 조건에 따라서 -250 ~ - 370 MPa의 응력이 발생하며 압축잔류응력이 발생하는 깊이은 20 - 40mm 사이이다.

2) 잔류응력의 변화는 표면에서 발생하는 최고온도에 따라서 변화하며 최고온도가 150℃ 이하에서는 잔류응력의 변화가 발생하지 않는다.

3) 제동전에 압축잔류응력이 약 -370MPa이므로 최고 온도가 약 300℃에서는 압축잔류응력이 인장잔류응력으로 바뀐다.

4) 접촉에 의한 잔류응력은 표면에서 발생하며 가감속시에 표면 y/a=1 이하에서 급격히 변화함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (NRL)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

(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 evalution and interpretation of the mechanically and thermally affected zone under railway wheel flats", wear 232, pp. 1 -14

(3) G Donzella, M Scepi, 1998, "The effect of block braking on the resdual stress state of a solid railway wheel", IMechE, pp. 145 - 158

(4) Gordon, J., Perlman, A.B, 1998 "Estimation of residual stresses in Railroad Commuter Car wheels Following Manufacture," ASME IMECE RTD

(5) 김국진, 최경진, 1993, "차륜균열 고장방지 대책 연구" 철도기술 연구보

(6) R. Lundin, 1991, "Contact region fatigue of railway wheels under combined mechanical rolling pressure and thermal brake loading", wear144, pp 57 - 70