

초기 잔류응력과 웹 플레이트 형상이 피로수명에 미치는 영향

Effect of initial residual stress and shape of web plate on fatigue life

*서정원¹, 권석진², 권성태¹

*J.W.Seo(jwseo@krri.re.kr)¹, S.J.Kwon², S.T.Kwon¹

¹ 한국철도기술연구원 철도시험인증연구센터, ² 한국철도기술연구원 철도시스템 연구본부

Key words : Residual stress, fatigue, web plate

1. 서론

차륜은 철도차량의 안전에 가장 큰 영향을 미치는 부품의 하나로써 이에 대한 신뢰성 확보가 중요하다. 차륜의 설계시 고려해야 할 인자는 차륜과 레일의 접촉에 의한 접촉면의 접촉피로, 제동열에 의한 열 피로 그리고 차륜의 플레이트 부분의 기계적인 피로이다. 차륜에 대한 수명평가에 관한 연구는 주로 제동열에 의한 열피로에 관한 연구(1,2,3)가 많이 진행되었으며, 최근에는 접촉면에 대한 연구가 진행되고 있다(4,5,6).

차륜의 플레이트부의 피로강도평가에 대하여는 UIC 510-5 "Technical approval of solid wheels" [2003. 2]⁽⁷⁾에 규정되어 있으며, 차륜의 손상에 가장 큰 영향을 미치는 3가지 주행조건에 대하여 정의하고 있으며 이로부터 피로강도를 평가한다. 이러한 강도평가는 차륜의 형상 및 하중조건이 모두 축대칭일 경우에 적용되며 주응력의 변화를 고려하지 않고 단축인 상태에서 평가한다. 3가지 하중조건에 대하여 최대값과 최소값을 구하여 이로부터 응력진폭과 평균응력을 구하여 Haigh Diagram을 통하여 안전여부를 결정한다. 차륜의 경우에는 접촉면의 경도를 높이기 위하여 제조시에 열처리를 실시하며 이때 접촉면 뿐만 아니라 웹 플레이트 부분에서도 잔류응력이 발생하며 이때 발생한 잔류응력의 크기는 웹 플레이트 형상에 따라서 다르게 발생한다.

본 논문에서는 초기 잔류응력과 웹 플레이트 형상이 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유한요소 해석을 실시하였고, UIC 510-5에 따라서 피로강도를 평가하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델 및 하중조건

Fig. 1은 유한요소해석을 위한 모델을 나타내고 있으며 해석을 위한 모델은 4가지이다. 차륜 디스크를 장착하는 웹 플레이트 부분이 평평한 차륜과 일반적으로 객·화차 차륜에 사용되는 S자형 차륜을 대상으로 하였고, 이를 신조차륜과 마모한도까지 마모된 차륜으로 구분하였다.

차륜의 강도평가에 대하여는 UIC 510-5 "Technical approval of solid wheels" [2003. 2]에 규정되어 있으며 이때의 하중조건은 다음과 같다. 3가지 하중조건에 대하여 응력을 계산하여 두 가지 방법으로 평가를 한다. 첫 번째는 각각에서 계산된 하중의 등가응력 (Von Mises stress)이 항복강도 이내이어야 한다. 두 번째 방법은 피로해석에 의한 것으로 각각의 하중에서 Mean stress와 Dynamic stress를 구한 후 허용응력을 만족하여야 한다.

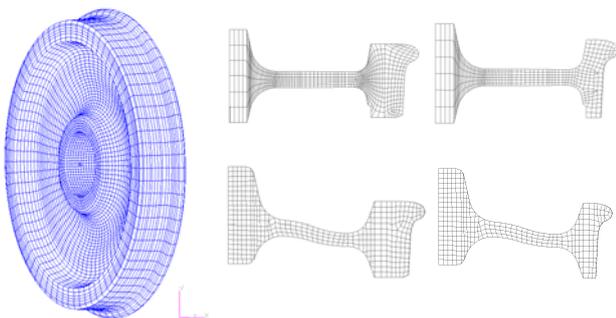
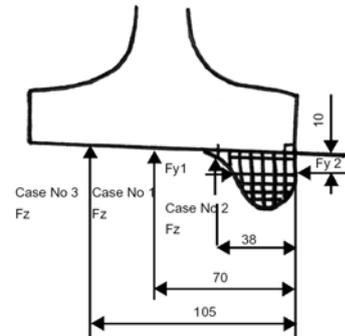


Fig. 1 F.E. Model



· Case 1 : Straight track, Case 2 : Full curves
Case 3 : Negotiation of points and crossings
Fig. 2 Load condition according to UIC

2.2 해석결과

Table 1는 각각의 하중조건별 최대발생응력을 나타낸 것으로 마모차륜에 더 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 평평한 웹 플레이트를 가진 차륜이 S-차륜 보다 큰 응력을 나타내고 있고 있다. 또한 신조차륜보다 마모차륜에서의 응력이 더 크게 발생하고 있고 특히 분기기 등을 통과 시 하중상태인 Case 3인 경우에는 80MPa에서 127MPa로 크게 증가하였다. 그러나 일반적으로 사용되는 차륜의 재질의 항복강도는 400MPa 이상으므로 첫 번째 평가방법에는 만족하고 있다.

Fig. 3은 Case2 하중조건으로 곡선구간을 통과 시 하중상태에서의 등가응력을 나타내고 있고 최대는 Plate부 아래쪽의 불연속부에서 발생하고 있다. 마모 차륜의 경우 역시 같은 변형 모습과 최대응력 발생위치는 동일하나 발생하는 최대응력만 다르다.

Table 1 Maximum stress according to load case(MPa)

Load case	Wheel with flat plate		Wheel with S-shape plate	
	New	Wear	New	Wear
Case 1	33.4	42.5	23.5	31.2
Case 2	117.3	126.1	80.0	84.1
Case 3	80.0	127.3	66.5	71.4

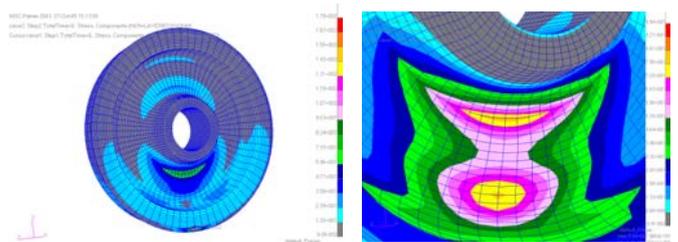


Fig. 3 F.E Analysis results

3. 피로강도평가

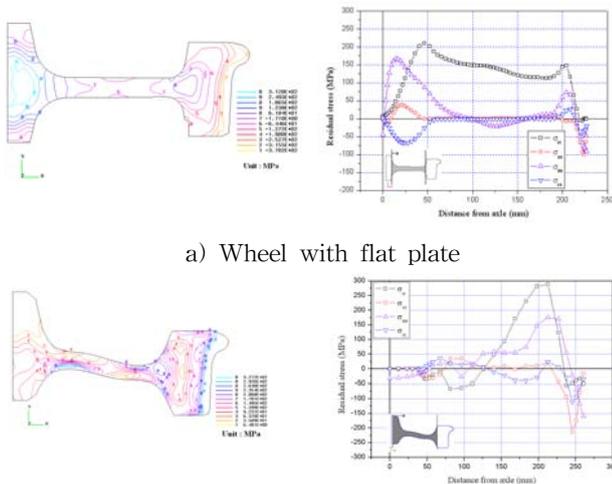
차륜의 경우에는 제조시에 잔류응력이 생성된다, 이러한 잔류응력은 Plate의 형상에 따라서 많이 변화하고 특히 담면제동을 사용하는 차륜의 경우에는 제동열에 의하여 열응력이 발생하

로 특히 중요하다.

3.1 잔류응력의 평가

철도차량 차륜은 차륜/레일 접촉면에서의 마모를 줄이기 위해 표면에서의 경도를 높이며 이를 위해 열처리를 실시한다. 이러한 열처리 과정에서 접촉면에 압축잔류응력이 발생하여 접촉면 손상을 억제하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 잔류응력의 해석은 해석모델 및 하중의 대칭성을 고려하여 축대칭 모델을 사용하였고, 열전달 해석을 수행한 후 이를 바탕으로 열응력 해석을 수행하였다. 열처리 과정은 대류조건을 사용하여 가열, 냉각, 뜨임, 냉각 순으로 적용하였다.

Fig. 4는 잔류응력 해석결과를 나타내고 있고 레일과 접촉면인 두부에서는 압축잔류응력이 발생하고 있다. 웹 플레이트 형상에 따라서는 평평한 웹 플레이트 가진 차륜의 경우에는 최대응력이 차축이 있는 부위인 보스부에서 발생하고 있고, S 형태의 웹 플레이트를 가진 차륜의 경우에는 두부와 만나는 부위에서 최대응력이 발생하고 있다. 잔류응력의 크기는 반경반향(σ_{rr})에서 두 종류의 차륜이 동일하게 크게 발생하고 있으며 S 형태의 웹 플레이트를 가진 차륜이 더 크게 발생하고 있다.



a) Wheel with flat plate
b) Wheel with S-shape plate
Fig. 4 Residual stress distribution

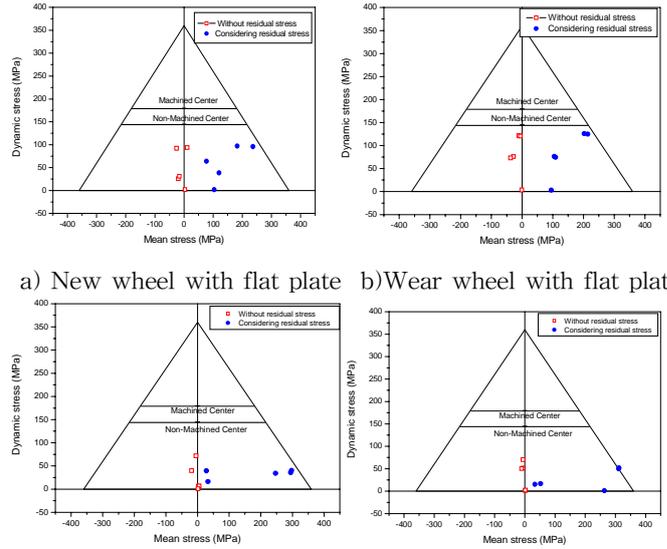
3.2 UIC에 따른 피로강도 평가

UIC에서의 피로강도 평가는 각각의 하중조건에 따라서 주응력의 최대값을 구하고 이때의 응력방향에서 최소의 응력을 구하여 다음의 식으로부터 평균응력과 동응력을 구하여 평가한다.

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_{dyn} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

여기서, σ_{mean} 은 평균응력, σ_{dyn} 는 동응력, σ_{max} 는 최대 응력, σ_{min} 는 최소응력을 나타낸다.

Fig. 5는 각각의 조건에 따라서 피로강도 평가를 수행한 결과이다. 잔류응력을 고려하지 않을 경우에는 평균응력이 거의 발생하지 않고 있으며 마모차륜이 더 큰 동응력이 발생하고 있다. 또한 평평한 웹 형태를 가진 차륜보다는 S 형태의 웹을 가진 차륜의 경우가 동응력이 더 크게 발생하고 있다. 잔류응력은 일반적으로 평균응력에 영향을 주므로, 잔류응력을 고려하여 평가한 결과로써 잔류응력의 영향으로 평균응력이 커짐을 알 수 있고 응력진폭은 변화가 없었다. S 형태의 플레이트를 가진 차륜의 경우에는 응력이 최대로 발생한 부분과 잔류응력이 최대로 발생한 부분의 위치가 유사하기 때문에 잔류응력으로 인한 평균응력의 변화가 크게 발생하고 있다. 따라서 S 형태의 플레이트 가지고 있는 마모차륜의 경우에는 피로한도 선도에 넘어서고 있다.



a) New wheel with flat plate b) Wear wheel with flat plate
c) New wheel with S plate d) Wear wheel with S plate
Fig. 5 Fatigue analysis results

4. 결론

유한요소법을 이용하여 차륜의 웹 플레이트에 대한 피로강도를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차륜의 웹 플레이트 형상에 따라서 잔류응력의 분포가 크게 변함을 알 수 있었고 최대 300MPa이 발생하였다.
2. 잔류응력을 고려하지 않을 경우에는 모든 부분이 피로한도 안의 안전영역에 존재하였다.
3. 잔류응력을 고려하여 피로강도를 평가하였으며 마모차륜의 경우에는 피로한도를 넘어선다.

후기

본 논문은 철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J. Gordon, A. Perlman, 1998, "Estimation of residual stresses in Railroad Commuter Car wheels Following Manufacture," ASME IMECE RTD
2. J. W. Seo, C. S. Suk, Y. J. Kim, 2002, "Change of residual stress of railway wheel by brake condition", Proceedings of the KSME Material and Fracture part., pp176-182
3. G. Donzella, M. Scepi, 1998, "The effect of block braking on the residual stress state of a solid railway wheel", IMechE, pp. 145 - 158
4. R. Lundin, 1991, "Contact region fatigue of railway wheels under combined mechanical rolling pressure and thermal brake loading", wear 144, pp 57 - 70
5. P. Mutton, 1991, "Rolling contact fatigue in railway wheels under high axle loads", wear 144, pp 193-152
6. A. Bernasconi, M. Filippini, S. Foletti, D. Vaudo, 2006, "Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading", Int. Journal of Fatigue, pp 663 - 672
7. UIC leaflet 510-5, 2003, "Technical approval of solid wheels"