탈선계수 측정용 고속철도차륜 구조건전성 평가

Structural integrity evaluation of high speed railway wheel which is used for derailment coefficient measurement

*전현규[1], 서정원[1], 함영삼[1]
*H.K.Jun(hkjun@krri.re.kr)[1], J.W.Seo[1] , Y.S.Ham[1]
[1] 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

Key words : Railway wheel, Structural integrity, Railway derailment coefficient

1. 서론

탈선계수는 철도차량의 주행안정성을 평가하는 중요한 파라미터로서 실제 차량운행상태 및 선로조건에서 운행차량에 측정용 윤축을 부착하고 선로를 주행하면서 스트레인게이지에서 측정된 신호로부터 탈선계수, 윤중감소, 횡압 등을 계산하여 전체 주행안정성을 평가하고 있다[1-5]. 그러나 이를 위해서는 측정용 윤축에 45° 또는 90°간격으로 구멍을 뚫어야 하며, 이로 인해 발생되는 응력집중으로부터 측정용 윤축이 충분한 구조건전성을 갖는지 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 향후 호남선에 투입예정인 KTX-II 열차의 측정용 윤축을 제작하기에 앞서 측정용 윤축에 대한 구조해석모델을 만들고 해석을 수행함으로써 측정용 윤축이 구조건전성을 유지하며 원활히 탈선계수를 측정할 수 있는지에 대한 평가를 수행하였다.

2. 탈선계수 측정원리

차량이 주행할 때 차륜과 레일은 차량 및 승객하중 외에 곡선 및 선로조건으로부터 발생한 복잡한 운동모드를 가지고 있으며, 이때 차륜과 레일의 접촉부에는 수직(윤중:P) 및 수평하중(횡압:Q)이 작용한다. 여기서 윤중과 횡압의 비를 탈선계수라고 정의하며 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어넘는 탈선이 발생한다.

$$\text{Derailment coefficient} = P/Q \qquad (1)$$

철도차륜 웹(web) 부위의 기하학적 형상은 곡선의 형태이므로 윤중과 횡압에 의한 응력성분에 간섭이 발생하므로 Eqn. (1)에 따라 탈선계수를 계산하기 위해서는 윤중과 횡압의 간섭이 최소화되는 위치를 찾고, 이 위치에 Fig. 1과 같이 구멍을 뚫고 스트레인게이지를 부착하여 로드셀(load cell)을 구성한 후 각각의 하중성분을 계산하고 있다[2-4].

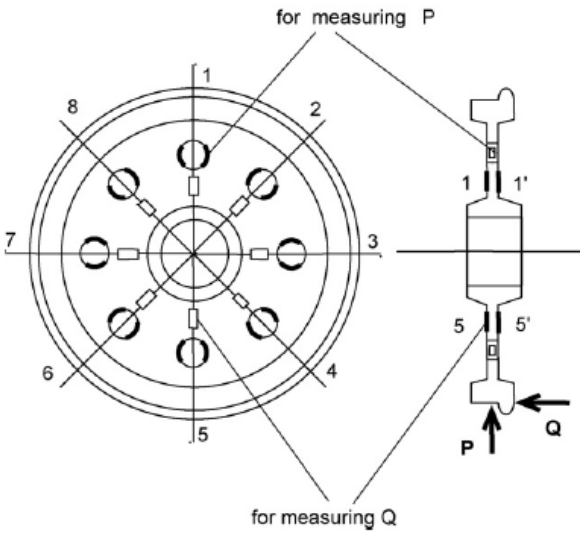

Fig. 1 A typical wheel-set for contact force measurement in conventional on-board method[2]

3. 고속철도 차륜 피로강도평가

3.1 해석모델

Fig. 2는 해석에 사용된 KTX-II 휠셋 형상으로 트레드(tread), 웹(web), 허브(hub) 및 보어(bore)가 하나의 구조물로 된 일체형 차륜이며, 축은 중공축이다. 먼저 구멍을 뚫지 않은 순수 차륜을 이용하여 윤중과 횡압이 각각 작용한 상태에서 서로 간섭이 최소화되는 위치를 결정하였으며, 해석결과를 바탕으로 하여 축 중심부로부터 300 *mm* 떨어진 위치에 90° 간격으로 구멍을 뚫은 후 구조건전성 평가를 위한 해석을 수행하였다.

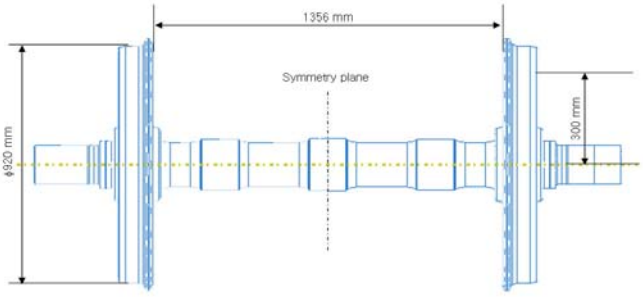

Fig. 2 Drawing of the wheel-set used to analysis

Fig. 3은 구조해석을 위한 유한요소모델로써 휠셋 중심의 대칭면(symmetry plane)을 기준으로 1/2만을 모델링하여 해석의 편의성을 증대시켰으며, 모델에 사용된 요소의 종류는 20절점사각이차요소(20 noded brick quadratic element)를 사용하여 해석의 신뢰성을 높였다. 해석모델을 구성하기 위해 사용된 요소의 개수는 46,336개, 절점의 개수는 214,948개이다.

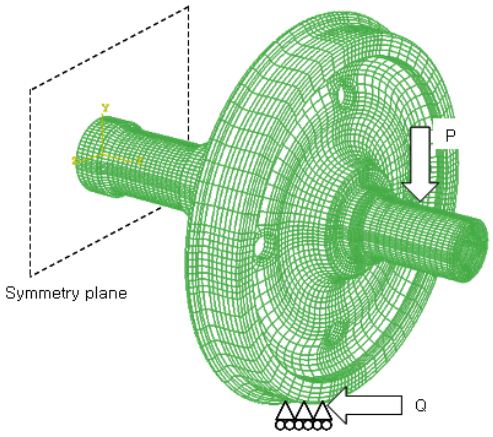

Fig. 3 Finite element model for structure analysis

해석은 가장 가혹한 하중상태를 고려하기 위하여 곡선주행시와 같이 윤중과 횡압이 동시에 차륜에 작용했을 경우에 대해 수행하였으며, 구멍위치에서의 응력분포를 계산하였다. 작용하중의 크기는 윤중, P=14,500/2 *kg*이며, 횡압, Q=P/2이다. 구속조건은 대칭면을 중심으로 하여 *x*축 방향으로 구속조건을 부여하였으며, 휠과 레일의 접촉위치에 해당하는 차륜의 트레드 위치에는

*y*축 방향으로 구속조건을 부여하였다. 또한 차륜의 수평이동(translation)을 방지하기 위하여 축 중심부의 한 점을 *z*축 방향으로 구속하였다.

3.2 해석결과

Fig. 4는 구조해석 결과로써 예상한 것과 같이 구멍경계에서 응력집중의 영향으로 최대 응력이 발생하였다. Fig. 5는 구멍주위의 주응력분포를 나타낸 것으로써 차륜의 바깥면과 안쪽면에서의 응력값이며, 바깥면에서의 최대주응력, σ_{max}=73.60 *MPa*, 안쪽면에서의 최대주응력, σ_{max}=44.67 *MPa*이다. 한편 최소주응력은 구멍의 위치가 하중의 작용방향과 90° 위치에 있을 경우로 거의 0 *MPa* 이다. 따라서 차륜이 1회전할 때 구멍의 경계에서는 바깥쪽면과 안쪽면에서 각각 진폭, σ_a=36.8 *MPa*, σ_a=22.34 *MPa*의 하중을 받는다고 할 수 있다.

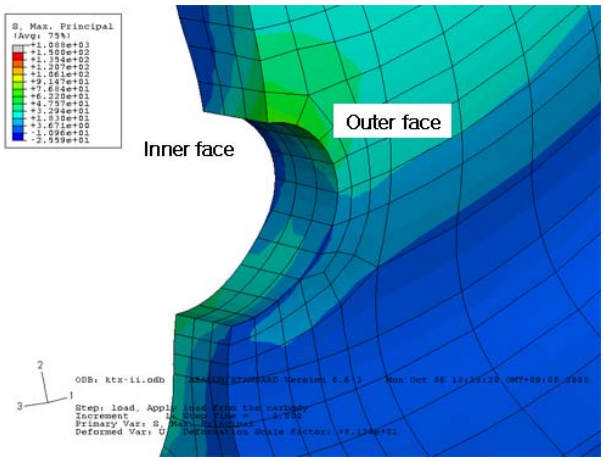

Fig. 4 Principal stress contour around the hole which is located above the wheel rail contact point

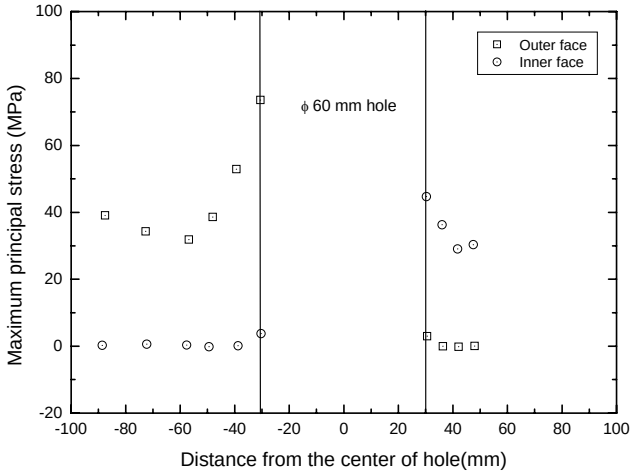

Fig. 5 Maximum principal stress distribution from the hole edge

3.3 피로강도 평가

Table 1은 고속철도 차륜의 재료물성치[6]로써 원주방향(circumferential)과 반경방향(radial)의 평균 인장강도는 각각 약 880 *MPa*, 879 *MPa* 이다. 피로한도(endurance limit)를 인장강도의 1/2로 가정했을 때 Goodman 선도[7]를 이용하여 구멍경계에서의 구조건정성을 평가하면 Fig. 6과 같다. 그래프에서 보는 것과 같이 바깥면과 안쪽면 구멍경계에서의 주응력은 손상이 발생할 수 있는 경계보다 매우 작으므로 차륜 웹(web) 부분에 구멍을 뚫음으로써 피로손상이 발생할 가능성은 없는 것으로 판단할 수 있다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e}+\frac{\sigma_m}{S_u}=1 \qquad (2)$$

Table 1 Material properties of high speed train wheel

Orientation		Sy (MPa)	Su (MPa)	Elongation (%)	RA* (%)
TC	1	553.6	872.3	21.39	45.24
	2	536.3	873.3	21.25	44.39
	3	554.5	894.2	20.98	43.54
TR	1	564.8	903.7	21.26	43.54
	2	564.2	894.4	21.55	46.29
	3	512.3	839.5	22.55	46.29

*RA : Reduction of area

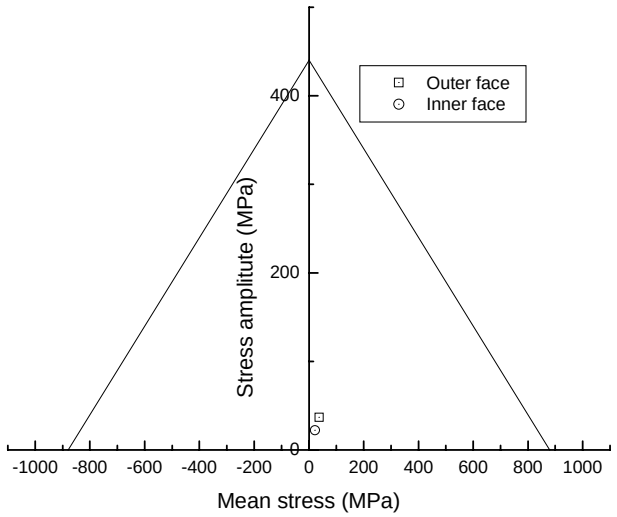

Fig. 6 Structural integrity analysis results at the hole edge

4. 결론

본 연구에서는 구멍뚫기 방법을 이용한 탈선계수 측정시 구멍에 의한 응력집중으로 인하여 차륜에 손상이 발생할 가능성이 있는지 검토하기 위하여 구조해석을 통한 건전성평가를 수행하였으며, 구멍으로 인한 응력크기가 손상이 발생할 수 있는 응력크기에 비해 매우 작으므로 탈선계수 측정시험 중 피로로 인한 손상이 발생할 가능성은 거의 없다는 결론을 얻었다.

참고문헌

1. UIC 518, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior-Safety-Track fagitue-Ride quality", International Union of Railway, 2005.
2. Matsumoto, A, et al., "A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations", Wear, vol. 265, pp.1518-1525, 2008.
3. 함영삼 외, “광주전동차 완성대차의 곡선추종성 및 주행안전성 평가에 관한 연구”, 한국철도기술연구원 연구개발보고서, 2003.
4. 함영삼, 오택열, “차륜/레일 작용력 측정을 위한 스트레인게이지 응용기술”, 한국정밀공학회 2004 춘계학술대회논문집, 2004.
5. 함영삼, 오택열, “평면 플레이트 형상을 가진 탈선계수 측정용 윤축의 구조해석”, 한국정밀공학회 2004 추계학술대회논문집, 2004.
6. 엄기영 외, “틸팅차량 운행시 유지보수시스템 기반구축연구”, 한국철도기술연구원 연구개발보고서, 2005.
7. Bannantine, J.A. et al, "Fundamentals of metal fatigue analysis", Prentice Hall, pp.1-10, 1990.