

원통형요소를 이용한 차륜-레일 접촉해석

Analysis of wheel-rail contact with cylindrical elements

*#이동형¹, 최하영¹, 권석진¹, 함영삼¹

*#D. H. Lee(dhlee@krii.re.kr)¹, H. Y. Choi¹, S. J. Kwon¹, Y. S. Ham¹

¹ 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 차륜궤도연구실

Key words : Wheel-rail contact, Finite element method, cylindrical element, contact pressure

1. 서론

철도차량 차륜과 레일의 반복적인 구름접촉에 의해 차륜뿐만 아니라 레일의 두부 및 게이지코너에서 마모와 피로손상이 발생한다. 철도차량 차륜 및 레일의 손상은 승차감, 주행안정성 등에 영향을 미치기 때문에 주기적인 삭정(grinding) 등 유지보수 및 관리에 많은 비용을 사용하고 있다. 차륜과 레일의 구름접촉에 의한 피로, 마모 손상을 저감하기 위하여 많은 연구[1]가 수행되었다. 차륜-레일 손상을 저감하기 위한 연구 중 차륜-레일 상호작용에 의한 접촉응력의 평가는 마모, 점착, 표면피로 손상 등 많은 현상들을 연구해야 하는 철도차량 연구에서 가장 중요한 연구 분야 중 하나이다[2].

유한요소법을 이용한 차륜-레일 접촉해석은 비선형 탄소성 재질 모델을 사용할 수 있고 실제의 접촉현상을 정확하게 해석할 수 있다는 장점이 있다[3,4]. 그러나 레일이 축대칭 형상이 아니기 때문에 축대칭 요소를 이용하여 비교적 간단하게 해석을 수행할 수 없고, 2차원 유한요소해석은 차륜 및 차축의 변형을 고려할 수 없다. 따라서 차륜-레일의 접촉해석은 3차원 유한요소해석을 수행하여야 정확한 결과를 도출할 수 있으나, 접촉영역 및 회전방향, 길이방향으로 요소(element)를 분할하게 되면 요소 및 노드수가 크게 증가하여 해석시간은 기하급수적으로 늘어난다.

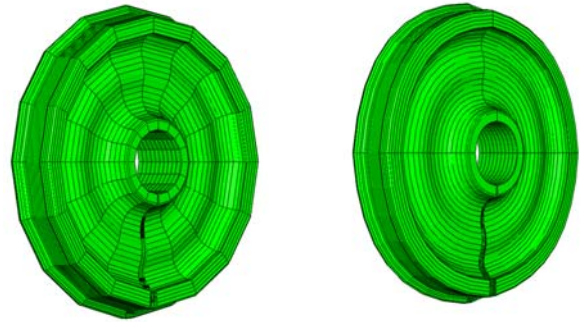
따라서 본 논문에서는 원통형 요소를 이용하여 차륜-레일의 3차원 유한요소 접촉해석을 수행하고 해석시간과 해석결과에 대하여 다른 조건의 요소를 사용하였을 경우와 비교, 검토하였다. 차륜의 경우 원통형 요소 및 일반적인 육면체 요소, 원통형과 육면체 혼합요소로 구성된 3가지 모델을 구축하였다. 레일의 경우 육면체 요소를 사용하여 모델링 하였으며, 차륜의 3가지 모델과 레일과의 접촉해석을 수행하였다. 해석결과 및 해석시간에 대하여 비교하여 가장 효율적인 해석방법을 검토하였다.

2. 유한요소해석

차륜-레일 접촉해석은 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS[5]를 이용하였다. 해석대상은 차륜직경 920mm의 KTX 동력차의 차륜과 UIC60 레일을 기준으로 하였다. 차륜 답면의 구배는 1/40, 레일의 구배는 1/20을 적용하였고, 차륜의 내측간의 거리는 1,355 mm, 궤간은 1,435 mm를 기준으로 하였다.

차륜의 모델링은 먼저 2차원 축대칭 모델을 만들고 symmetric model generation 방법[5]을 사용하여 2차원 모델을 회전시켜 3차원 모델을 구축하였다. 레일과 접촉이 일어나는 영역은 조밀하게 분할하였고, 그 이외의 영역은 듚성하게 분할하였다.

첫 번째 모델은 차륜을 일반적인 3차원 육면체 요소(C3D8)로 구성하였으며, Fig. 1 (a)와 같다. 접촉영역을 제외한 차륜의 회전방향으로 최소한의 원통형상이 될 수 있도록 분할하였다. 차륜의 접촉영역은 폭 방향 및 회전방향으로 최소 요소크기가 1 mm 가 되도록 분할하였다. 두 번째 모델은 차륜을 원통형 요소(CCL12)로 구성하였으며, Fig. 1 (b)와 같다. 접촉영역을 제외한 차륜의 회전방향 영역은 4개의 원통형 요소로 분할하였다. 차륜의 접촉영역은 최소 요소크기가 폭방향으로 1 mm 가 되도록 하였다. 회전방향으로는 symmetric model generation 방법에서 가능한 최소크기의 메쉬 분할은 회전방향으로 0.5° 이었으므로, 이를 적용하면 접촉영역에서의 요소크기는 4 mm 이다. 중간 절점을 고려하면 최소크기는 약 2 mm 이다. 세 번째 모델은 차륜의 접촉영역은 일반적인 3차원 육면체 요소로 하고 접촉영역



(a) All general elements (b) All cylindrical elements

Fig. 1 FE model of railway wheel

Table 1 FE Size data of wheel-rail contact models

Model Characteristics	Number of Nodes	Number of Elements	Total number of variables
All general elements (C3D8)	75,774	67,956	222,393
All cylindrical elements (CCL)	57,774	38,024	168,393
Cylindrical/general elements	66,774	55,128	195,393

이외의 부분은 차륜의 회전방향으로 4개의 원통형 요소를 사용하였다. Table 1에 각 모델의 절점 및 요소, 해석변수의 수를 나타내었다. 레일은 일반적인 3차원 육면체 요소(C3D8)로 모델링 하였으며 레일의 길이는 침목간의 거리를 고려하였다. 레일의 차륜 접촉면은 최소요소크기가 폭 방향 및 길이 방향으로 1 mm 가 되도록 분할하였고, 접촉영역이외 부분은 듚성하게 분할하였다. 레일의 절점 및 요소수를 줄이기 위하여 접촉영역 이외 부분은 접촉영역 부분과 Tie 접촉을 사용하였다.

차륜 답면의 접촉영역을 master 접촉 요소로 하고, 레일의 접촉면을 slave 접촉요소로 하여 가능한 접촉영역을 접촉쌍(contact pair)으로 지정하였다. 차륜 및 레일의 탄성계수는 207GPa, 포아송 비(Poisson's ratio)는 0.3을 적용하였다. 차륜 및 레일 접촉면의 마찰계수는 0.3를 적용하였다. 하중조건은 수직력 85kN을 기준으로 하였고, 차륜의 압입부에 수직하중을 부가하였다. 경계조건으로 차륜의 회전 방지를 위해 차륜 압입부에 MPC 조건을 사용하였고, 레일의 양쪽 끝단은 모든 방향의 변위를 고정하였다. Fig. 2 는 완성된 원통형 차륜 모델과 레일의 유한요

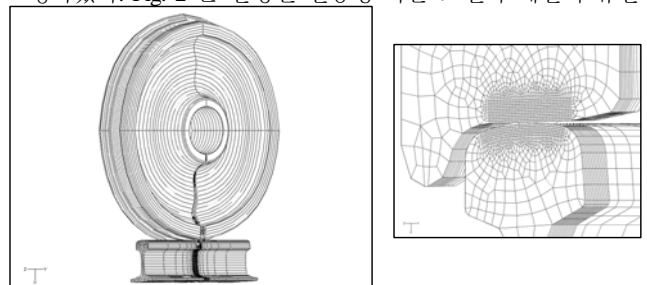


Fig. 2 FE model of contact between wheel and rail

소 해석모델이며, 차륜-레일 접촉영역의 조밀한 요소를 함께 나타내고 있다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 접촉해석 결과

Fig. 3 은 첫 번째 모델인 3차원 육면체 요소의 접촉해석 결과인 접촉압력 분포를 나타낸 그림이다. 최대접촉 압력은 레일 접촉영역의 폭방향 중심 부근에서 1,174 MPa 이다. 접촉압력 분포는 레일의 폭 방향으로 최대치를 기준으로 좌우대칭이 아니며, 길이 방향으로 Hertz 압력분포와 같은 대칭형의 모양을 나타내고 있다. 레일 폭 방향으로의 압력분포 차이는 최대치를 기준으로 왼쪽은 레일의 곡률반경 R300 의 접촉위치이고, 오른쪽 부분은 R80의 위치이기 때문에 접촉압력의 분포가 비대칭의 형상을 나타내며 곡률반경이 작은 오른쪽 접촉영역에서 가파른 압력변화가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4는 차륜을 원통형 요소로 모델링하여 해석한 접촉압력의 분포를 나타낸다. 최대접촉압력은 레일 접촉영역의 폭방향 중심 부근에서 약 1,176 MPa 이었다. 레일 폭방향 및 길이방향의 접촉압력 분포는 육면체 요소를 사용했을 경우와 비교하여 약간의 차이를 나타낸다. 이것은 차륜 회전방향으로 원통형 요소의 길이가 육면체 요소의 길이와 비교하여 크기 때문에 절점을 기준으로 접촉압력 및 변형량 등을 계산하는 유한요소해석의 특징인 것으로 판단된다. 세 번째 모델인 차륜의 접촉영역은 육면체요소를 사용하고 접촉영역 이외의 회전 방향영역은 원통형 요소로 모델링 하여 해석한 결과, 접촉압력의 최대치 및 분포는 육면체 요소를 사용한 해석결과와 거의 일치하였다.

Fig. 5 는 3차원 육면체 요소를 이용한 차륜-레일 접촉시 레일 접촉면에 발생하는 응력(von Mises) 분포를 나타낸 그림이다. 최대 응력은 레일 중심에서 한쪽으로 치우친 곡률반경이 R80인 위치에서 발생하였다. 두 번째 모델인 원통형 요소를 사용하였을 경우 레일 접촉면에 발생하는 최대 접촉응력의 위치는 육면체 요소를 이용하였을 경우와 비슷하지만, 접촉응력의 분포는 불연속적으로 차이가 발생하였다. 이것은 접촉압력의 분포와 같이 접촉영역에서의 요소 크기의 차이 때문인 것으로 판단된다. 세 번째 모델인 차륜의 접촉영역은 육면체요소를 사용하고 접촉영역 이외의 회전방향 영역은 원통형 요소로 모델링 하여 해석한 접촉응력 분포 및 최대치는 육면체 요소를 사용한 해석결과와 거의 일치하였다.

3.2 수렴 및 해석시간

각각의 요소모델을 이용하여 차륜-레일 접촉해석시 컴퓨터

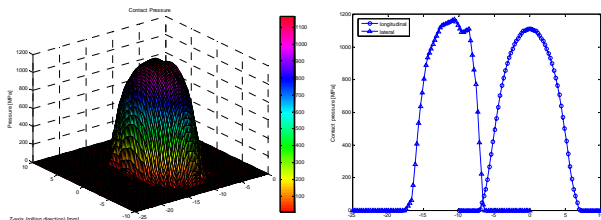


Fig. 3 Contact pressure distribution for model with all general elements

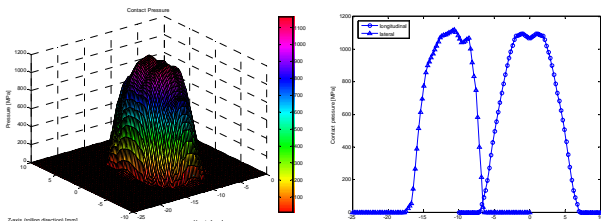


Fig. 4 Contact pressure distribution for model with all cylindrical elements

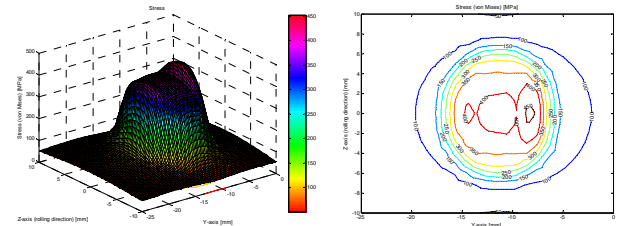


Fig. 5 Contact stress (von Mises) distribution for model with general elements

CPU 사용시간 및 반복계산수를 나타낸 결과는 Table 2와 같다. 육면체 요소를 사용한 모델이 가장 해석 시간이 많이 소요되었으며, 원통형 요소를 사용한 모델이 해석 시간이 가장 짧았다. 반복계산수 대비 CPU 사용시간은 원통형 요소를 사용한 모델, 원통형 및 육면체 요소를 사용한 모델, 육면체 요소를 사용한 모델 순으로 짧은 결과를 나타내었다.

Table 2. Runtime performance of wheel-rail contact models

Model Characteristics	CPU time (sec)	Total iterations	CPU/iteration (sec)
All general elements (C3D8)	10,745	23	467
All cylindrical elements (CCL)	4,758	21	227
Cylindrical/gen-eral elements	9,622	24	401

4. 결론

원통형 요소를 이용하여 차륜-레일의 3차원 유한요소 접촉해석을 수행하였고 다른 조건의 요소를 사용하였을 경우의 해석시간과 해석결과에 대하여 비교, 검토하였다. 전체 차륜을 육면체 요소로 모델링한 경우의 접촉해석결과가 가장 정확하였으나, 해석시간이 가장 많이 소요되었다. 접촉해석 결과의 정확성 및 해석시간을 고려할 때 가장 적합한 모델은 차륜의 접촉면은 육면체 요소를 사용하고 차륜의 회전방향으로 원통형 요소를 사용한 혼합모델이다. 레일의 마모 해석 등과 같이 반복적으로 유한요소해석을 수행할 경우 해석결과의 정확성뿐만 아니라 해석시간도 매우 중요한 인자이므로 차륜의 모델링시 원통형 및 육면체 요소를 적절하게 사용한다면 효과가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 전현규, 이동형, 서정원, 권석진, "차륜-레일 구름접촉에 의한 피로손상 연구동향", 한국철도학회지, 제11권, 제4호, pp.35-41, 2008.
- [2] M. Pau, F. Aymerich, F. Ginesu, "Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area", *Wear*, 253, pp. 265-274, 2002.
- [3] T. Telliskivi, U. Olofsson, "Contact mechanics analysis of measured wheel-rail profiles using the finite element method", *Proc Instn Mech Engrs*, Vol. 215 Part F, pp. 65-72, 2001.
- [4] M. Wiest, E. Kassa, W. Daves, J.C.O. Nielsen, H. Ossberger, "Assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact", *Wear*, 265, pp. 1439-1445, 2008.
- [5] *ABAQUS user's and theory manual*, Version 6.4, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc., 2003
- [6] K.T. Danielson, A.K. Noor, "Three-dimensional finite element analysis in cylindrical coordinates for nonlinear solid mechanics problems", *Finite Elements in Analysis & Design*, 27, pp.225-249, 1997.