

유한요소해석을 이용한 3차원 구름접촉 해석

3-Dimensional Rolling Contact Analysis Using Finite Element Method

*최하영², #이동형¹, 유원희¹, 이광수²

*H. Y. Choi², #D. H. Lee(dhlee@krii.re.kr)¹, W. H. You¹, J. Lee²

¹ 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 ² 연세대학교 기계공학과

Key words : Rolling Contact, Finite Element Method, Friction, Creep

1. 서론

철도 차량의 고속화는 견인력 및 축중을 증가시키고 있으며 피로 및 마모 등에 의한 차륜과 레일의 손상을 증가시키고 있다. 매년 차륜과 레일을 유지보수하기 위해 많은 비용이 지불되고 있다.

구름접촉은 차륜과 레일 손상의 주요 원인이 되므로 매우 중요하다. 구름접촉해석은 철도 차량의 차륜과 레일뿐만 아니라 베어링, 기어 등 회전하는 많은 기계부품에서도 매우 중요한 문제이며, Kalker[1], Johnson[2], Telliskivi[3] 등은 수치적 해석방법으로 많은 결과들을 발표하였다. Björklund 과 Andersson[4]이 경계요소법(boundary element method)을 이용하여 구름-미끄럼 접촉(rolling-sliding contact) 문제를 해석하였다.

Kalker의 구름 접촉에서 중요한 특징 중 하나가 마찰에 의해 접촉면에 접선방향의 하중이 발생한다는 것이다. 그리고 구름 접촉에 의해 접촉 영역이 미끄럼부분(sliding segment)과 고착부분(sticking segment)으로 나누어지는 것이다. 접촉영역의 모양과 접촉영역의 크기는 구름접촉 문제를 해석하는데 가장 중요한 특징들이다.

수치해석 프로그램 CONTACT [5]은 계산이 매우 빠르지만 일반적인 기하학적 형상의 차륜과 레일 접촉에서 대략적인 근사값을 얻을 수 있다. 그리고 수치 해석방법은 반무한 공간과 쿨롱의 마찰 법칙을 기본으로 하고 있다. 반면 3차원 유한요소해석은 반무한 공간의 제약이 없으므로 복잡한 기하학적 형상을 갖는 경우와 마모에 의해 부분적으로 기하학적 형상이 변화하는 경우에서도 접촉문제를 해결할 수 있다. 따라서 3차원 유한요소방법은 해석모델을 실제 상황에 근접하게 모사할 수 있다. 차륜과 레일은 복잡한 기하학적 형상을 가지고 있고 특히 곡선부 주행에서의 접촉은 2점 접촉이 발생하기 때문에 해석이 매우 어렵다. 차륜과 레일은 실제 복잡한 기하학적인 형상을 가지고 있으며 주행선로에 따라 다중접촉을 한다. 따라서 마모와 피로와 같은 손상을 예측하기 위해서는 3차원 유한요소 방법으로 차륜-레일의 정확한 구름 접촉 해석 방법을 개발하는 것이 요구된다.

본 논문에서는 3차원 유한요소방법을 이용한 구름접촉 해석방법을 개발하기 위하여 탄성 롤러와 강체 롤러의 3차원 정적 상태 구름 접촉(3-dimensional steady state rolling contact) 해석을 하였다. 마찰계수와 크립(creep)의 변화가 마모에 많은 영향을 미치는 요인인 미끄럼-고착 영역의 분포에 주는 영향을 살펴보았다.

2. 구름접촉의 관련이론

두 개의 롤러가 구름 접촉을 할 때 접촉하는 두 롤러의 접선면은 평행한 축에 대해 상대 각운동을 한다. x 축을 중심으로 각속도 Ω 로 회전한다. 두 개의 롤러의 접선속도가 같을 때는 freely rolling 상태를 나타내고, 두 개의 롤러의 접선속도가 같지 않을 때는 미끄럼을 동반하는 tractive rolling 상태를 나타낸다.

두 물체의 접촉면에서 발생하는 수직방향의 접촉응력은 Hertz 이론[6]으로 구한다. 접선방향의 접촉응력은 마찰이 없는 경우에는 접촉면에서는 존재하지 않지만 두 물체 사

이에 마찰이 존재할 때는 접촉면에 전단응력이 존재한다. 접촉면의 전단응력을 접촉면 전체가 미끄럼 영역일 경우에는 Coulomb의 마찰 법칙에 의해 구할 수 있다. 부분적으로 미끄럼 영역과 고착영역이 동시에 나타날 경우 Mindlin-Cattaneo 해법[7]으로 구할 수 있다.

3. 구름접촉의 유한요소해석

3.1 접촉해석 모델

마모와 피로로 인한 손상을 예측하기 위해서는 정확한 접촉압력, 접촉영역의 크기, 미끄럼 영역, 고착영역의 분포를 예측하는 것이 중요하다. 이것을 예측하기 위해서 3차원 유한요소방법을 이용하여 롤러의 구름접촉해석을 하였다. 해석에 사용된 롤러의 형상 및 유한요소해석모델은 Fig.1과 같다. 롤러 1의 회전방향의 반경은 32.5 mm 이고, 롤러 2의 반경은 32 mm 이다. 롤러 1의 횡방향 반경은 125 mm 이고 롤러 2는 ∞ 이다. 롤러 1의 재료상수로 프아송비는 0.25, 탄성계수는 200 000 MPa 이고 롤러 2는 강체이다. 구름접촉해석은 상용프로그램 ABAQUS[8]의 Steady-state transport analysis 를 이용하였다. 수직하중은 410 N 을 가하였으며 롤러 2 를 10 mm/s 로 유지하면서 회전시키고 롤러 1의 속도를 변화시켜 크립을 변화시켰다.

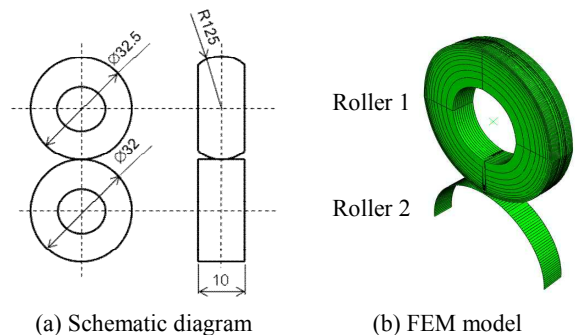


Fig. 1 The model of simulated rollers.

3.2 접촉해석 결과

구름접촉해석에서 접촉부의 모양과 크립의 변화는 매우 중요하다. 특히 Achard의 마모 법칙에 의하면 접촉압력은 마모량과 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 접촉영역에서 접촉압력의 분포의 해석은 매우 중요하다. 크립의 방향과 크기는 레일 게이시-차륜 플렌지 접촉 해석에서 더욱 중요

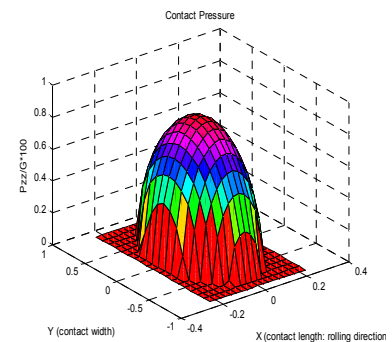


Fig. 2 Hertzian contact pressure.

하다. 본 논문의 3 차원 유한요소해석의 검증을 위해서 Kalker 이론의 접촉 해석결과와 Qiao 등의 시뮬레이션 결과 [9]를 비교하였다.

해석의 첫번째 단계에서는 롤러 1 을 고정하고 롤러 2 에 수직 하중을 가해 두 롤러가 접촉하도록 하였다. 이때 Hertz 의 이론으로 구한 최대접촉압력의 크기는 1.35 GPa 이고 접촉영역의 장축의 길이 2a 는 1.48 mm, 단축의 길이 2b 는 0.38 mm 이다. Hertz 의 접촉압력 분포는 Fig. 2 에서와 같다. 그리고 3 차원 유한요소방법으로 해석한 결과는 Hertz 의 이론치에 비해 최대접촉압력은 0.9%, 장축의 크기 2a 는 4.7%, 단축의 크기 2b 는 2.1% 차이로 잘 일치하였다.

두 롤러의 마찰계수를 0.1 로 유지하면서 크립을 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005 로 변화시키면서 구름접촉해석을 수행한 결과는 Fig. 3 과 같다. Fig. 3 에서 (a)는 접촉면에서의 수직접촉압력과 (b)는 접선방향의 트랙션의 분포를 나타내었다. Fig. 3 은 크립이 증가할수록 접선방향의 트랙션의 크기가 증가하고 있음을 보여주고있다. Fig. 4 에서 크립 0.001 로 유지한 상태에서 마찰계수를 1.0, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01 로 적용하여 해석하였을 때의 접촉면에서 수직하중과 접선 방향의 트랙션의 분포를 나타내었다. 마찰계수가 커질수록 접선방향의 트랙션의 크기가 커졌다. Fig.3~Fig. 4 의 수직 접촉압력과 접선방향의 트랙션의 분포가 Qiao 등의 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.

유한요소해석 결과의 미끄럼 영역과 고착 영역 분포를 Fig. 5 에서 보여주고 있으며 A 는 고착 영역을 나타내고 S 는 미끄럼 영역을 나타낸다. Fig. 5 는 크립이 증가하면 미끄럼 영역도 증가하는 것을 보여주고 있다. Fig. 6 은 마찰계수가 0.1 이고 크립 0.003 일 때 CONTACT 프로그램으로 계산한 미끄럼 영역과 고착 영역의 분포를 나타내고 있다. CONTACT 프로그램에 의한 접선방향의 트랙션의 분포는 Fig. 6(a)에서 나타내고 미끄럼-고착영역은 Fig. 6(b)에서 나타내었다. Fig. 6(a)의 트랙션 분포와 Fig. 3(b)의 크립 0.003 의 트랙션 분포의 방향은 회전방향의 차이로 인해 반대이지만 크기는 비슷한 경향을 보이고 있다. 해석결과를 정리하면 크립이 증가할 때 미끄럼 영역이 증가하고, 미끄럼 영역이 증가할수록 접촉압력은 거의 변화없이 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

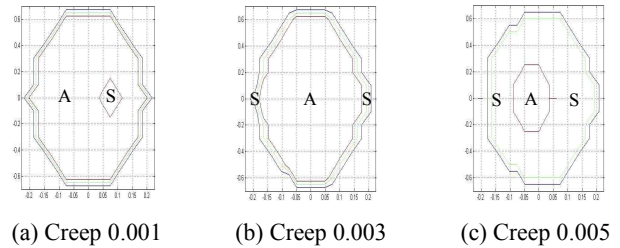


Fig. 5 Stick-slip region along contact surface.

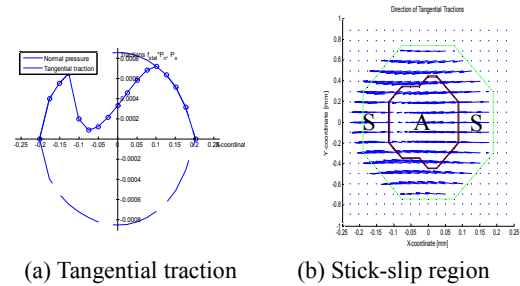


Fig. 6 Tangential traction and stick-slip region along contact surface.

4. 결론

3 차원 유한요소해석을 이용한 롤러의 구름접촉해석을 수행하였으며, 구름 접촉에서 마찰 계수항은 미끄럼 영역과 고착 영역에 영향을 미치고 있으며, 미끄럼 영역의 변화에 의해 접촉압력 크기와 접선방향의 트랙션에 영향을 주고 있음을 확인 할 수 있었다. 크립항 또한 미끄럼영역과 고착영역에 영향을 주고 있었다. 향후 3 차원 유한요소 방법을 이용한 구름접촉과 마모 예측 결과를 구름접촉 시험의 결과값과 비교하여 실제값에 더 근접한 해석모델을 개발할 예정이다.

참고문헌

1. J.J. Kalker, "Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact," Kluwer Academic Publishers, 1990.
2. K.L. Johnson, "Contact mechanics", Cambridge University Press, 1985.
3. T. Telliskivi "Simulation of wear in a rolling-sliding contact by a semi-Winkler model and the Archard's wear law", Wear, 258, 817-831, 2004.
4. S. Björklund and S. Andersson, "A numerical method for real elastic contacts subjected to normal and tangential loading", Wear 179, 117-122, 1994.
5. E.A.H. Vollebregt., "User guide for CONTACT, J.J. Kalker's variational contact model." Technical report TR09-03, VORtech BV, Delft, The Netherlands, 2009.
6. S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, "Theory of Elasticity", 3rd edition, McGraw-Hill, 414, 1970.
7. D.A. Hills, D. Nowell, "Mechanics of fretting fatigue", Kluwer Academic Publishers, 1994.
8. ABAQUS version 6.4, "ABAQUS Analysis user's manual", Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc., 2003
9. L. Qiao, M. Hillmann and R. Sünkel, "Tangential loading transportation between roller and flat with modified coulomb friction-A three-dimensional roll-contact calculation with the finite element method", Computers & Structures, 58, 1031-1043, 1996.

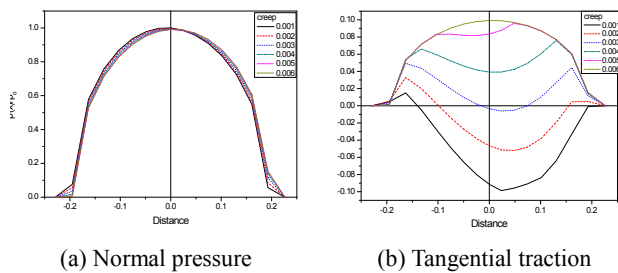


Fig. 3 Normal pressure and tangential traction with different creep.

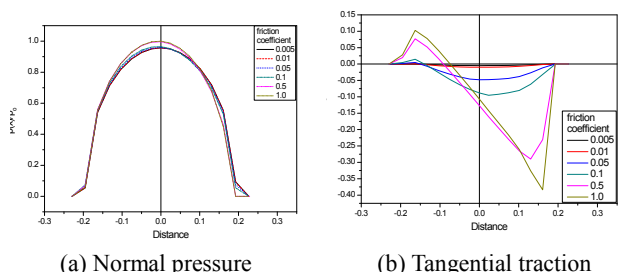


Fig. 4 Normal pressure and tangential traction with different friction.