

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안정성 향상 기술

3 차원 유한요소법을 이용한 정상상태의 구름접촉해석

Three-Dimensional Steady-state Rolling Contact Analysis using Finite Element Method

이동형^{1,✉}, 서정원¹, 권석진¹, 함영삼¹
Dong-Hyong Lee^{1,✉}, Jung-Won Seo¹, Seok-Jin Kwon¹ and Young-Sam Ham¹

1 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 (Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: dhlee@krri.re.kr, Tel: 031-460-5246

Manuscript received: 2011.3.21 / Accepted: 2011.4.5

Because most fatigue cracks in wheel and rail take place by rolling contact of wheel and rail in railroad industry, it is critical to understand the rolling contact phenomena, especially for the three-dimensional situation. This paper presents an approach to steady-state rolling contact problem of three-dimensional contact bodies, with or without tangential force, based on the finite element method. The steady-state conditions are controlled by the applied relative slip and tangential force. The three-dimensional distribution of tangential traction and contact stresses on the contact surface are investigated. Results show that the distribution of tangential traction and contact stresses on the contact surface varies rapidly as a result of the variation of stick-slip region. The tangential traction is very close in form to Carter's distribution.

Key Words: Rolling Contact (구름접촉), Steady-state (정상상태), Finite Element Method (유한요소법), Stick (점착), Slip (미끄럼), Contact Stress (접촉응력)

1. 서론

철도차량 차륜과 레일은 반복적인 구름접촉에 의해 마모와 피로손상이 발생하며, 이와 같은 손상은 차량의 주행안정성 등에 큰 영향을 미친다. 따라서 차륜과 레일의 구름접촉에 의한 피로, 마모 손상을 저감하기 위하여 많은 연구가 수행되었다.^{1,2} 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.³

차륜-레일의 접촉과 같이 견인력 및 제동력이 존재하는 구름접촉 해석에 관한 연구는 Carter⁴에 의해 시작되었다. 그는 차륜을 원통으로, 레일을

두꺼운 평판으로 가정하고 미끄럼과 점착영역에 대한 2 차원 정밀해를 계산하였으나, 횡방향 하중에 대한 해석은 수행하지 못하였다. Johnson⁵은 Carter의 결과를 회전방향 및 횡방향 미끄럼(creepage) 접촉으로 일반화시켰으나, Hertz 접촉이론에 기초를 하고 있다. Kalker⁶는 두 탄성체에 회전방향 및 횡방향, 회전방향(spin) 미끄럼이 발생할 경우의 3 차원 구름접촉문제를 일반화하였다. 그 후 접촉면적의 형상이 타원형이 아닌(non-Hertzian) 임의 형상을 갖는 물체의 구름접촉문제를 해석하였다.

이와 같은 기존의 접촉이론들은 선형-탄성 재질이고 반무한체(half-space)의 접촉이라는 가정에 기반을 두고 있다. 그러나 실제의 차륜-레일 접촉에서는 소성변형에 의해 손상이 발생한다. 또한,

접촉면의 크기가 접촉물체의 곡률반경에 비해 상당히 작다는 반무한체 접촉의 가정은 레일의 게이 지 코너(gauge corner)부위에 접촉이 일어날 때, 접촉영역의 크기는 곡률반경과 큰 차이가 없기 때문에 성립하지 않는다. 그리고 접촉이 발생하는 접촉면의 형상만을 고려하여 해석하기 때문에 실제 차륜 및 차축의 변형 때문에 발생하는 접촉위치의 변화를 해석할 수 없다. 따라서 이와 같은 기존의 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 유한요소법을 이용한 구름접촉 해석이 수행되고 있다.^{7,8}

본 논문에서는 두 개의 원통이 구름접촉 할 때 발생하는 마모 예측을 하기 위한 전 단계로 구름접촉 시 접촉영역에서 발생하는 접촉응력 및 미끄럼량 등을 유한요소법을 이용하여 정확하게 해석하고자 하였다. 구름접촉 시험을 수행할 두 개의 원통형 시험편을 대상으로 구름접촉 시 폭 방향 및 구름방향으로의 접촉응력을 해석하기 위하여 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 탄성체와 강체가 구름접촉 할 경우 마찰계수 및 슬립을 변화에 따른 접촉응력의 변화를 해석하였고, 탄성체간 구름접촉 할 경우 구름접촉이 발생하기 전과 구름접촉이 일어난 후 정상상태가 되었을 때의 접촉응력을 해석하고 비교하였다.

2. 유한요소해석

구름접촉 해석은 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS⁹ 를 이용하였다. 해석은 Fig. 1 과 같이 직경 50 mm, 접촉부 접촉반경 125 mm 의 롤러 1 (top roller)과 직경 50 mm 이고 접촉부가 편평한 롤러 2 (bottom roller)를 대상으로 하였다. 탄성체와 강체가 구름접촉 할 경우의 해석은 롤러 2 를 강체로 모델링 하였다.

롤러의 폭방향 및 구름방향의 접촉응력을 해석 하기 위하여 3 차원 유한요소 해석 모델을 구축하였다. 요소와 절점의 수를 최소화하기 위하여 접촉이 발생하지 않는 영역의 경우 원통형 요소 (CCL12)를 사용하였고, 접촉이 발생하는 영역은 3 차원 육면체 요소(C3D8)를 사용하였다.

접촉이 일어나는 영역은 접촉영역에서 접촉변수가 급격히 변화하므로 구름 방향으로 최소 요소의 크기가 0.05 mm 가 되도록 조밀하게 분할하였고, 그 이외의 영역은 듬성하게 분할하였다. 각 탄성체 롤러의 탄성계수는 207 GPa, 포아송 비 (Poisson's ratio)는 0.3 을 적용하였다.

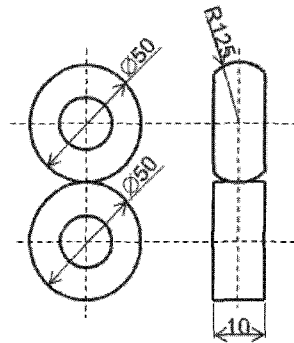
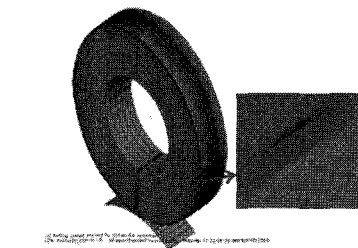


Fig. 1 Rolling contact test specimen.

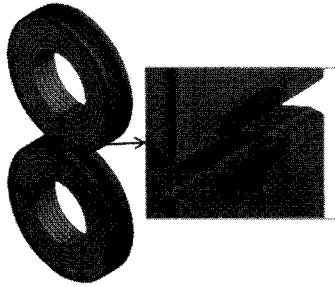
마찰해석은 미끄럼 및 점착현상을 정확하게 해석할 수 있는 라그랑지 방법(Lagrange multiplier friction formulation)을 적용하였다. 접촉영역은 접촉쌍(contact pair)으로 지정하였다.

실제 두 개의 롤러가 회전하면서 회전력을 전달하는 조건을 부여하기 위하여 각 롤러의 회전 중심 위치에 기준 절점(reference node)을 설정하고 시편의 6 자유도에 대하여 kinematic coupling 조건을 적용하였다. Fig. 2(a)는 탄성체와 강체, Fig. 2(b)는 탄성체간의 구름접촉해석 모델을 나타내며, 접촉영역의 조밀한 요소를 함께 나타내고 있다.

해석방법의 검증을 위하여 한 개의 원통에 수직 하중이 작용하고 미끄러지지 않을 정도의 접선방향 하중이 작용할 경우 접촉압력과 접선방향 트랙션(traction) 분포를 해석하였고, 그 결과를 Cattaneo-Mindlin 의 이론해¹⁰ 와 비교하였다. Fig. 3(a)는 접촉압력 해석결과와 이론해를 비교한 그림이고, Fig. 3(b)는 접선방향 트랙션의 해석결과와 이론해를 비교한 그림이다. 유한요소 해석결과는 접촉면의 중앙에 점착영역과 바깥쪽의 미끄럼영역을 명확히 나타내었고, 접촉압력 및 접선방향 트랙션의 분포는 이론해와 거의 일치하였다.



(a) Rolling contact with rigid surface



(b) Rolling contact of similar rollers

Fig. 2 FE model for rolling contact analysis.

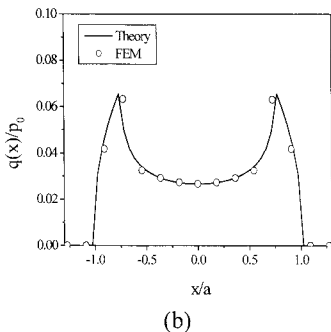
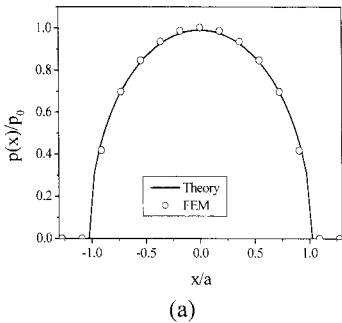


Fig. 3 Distribution of (a) contact pressure and (b) tangential traction along contact surface.

3. 해석결과 및 검토

3.1 탄성체와 강체의 구름접촉

구름(rolling)이란 공통의 접선 평면에 평행한 두 축에 대하여 접촉하고 있는 두 물체사이의 상대 각 운동으로 정의할 수 있다.¹⁰ 두 물체의 접선 속도가 동일하지 않으면 구름운동은 미끄럼(sliding)을 동반하며, 각속도가 동일하지 않으면 스핀(spin)을 동반한다. 또한, 접선방향 힘(tangential force) Q 가 영(zero)일 때 순수 구름접촉(free rolling) 이라고 하고 영이 아닐 때 구름접촉(tractive rolling) 이라 한다.

앞에서 구축한 유한요소모델을 이용하여 강체

와 탄성 롤러가 구름접촉을 하여 순수 구름접촉 상태가 되었을 때를 해석하였다. Fig. 4 는 순수 구름접촉 시 마찰계수 변화에 따른 접선방향 트랙션의 변화를 나타낸다. 순수 구름접촉 시 마찰계수가 커짐에 따라 접선방향 트랙션은 증가한다. 또한, 접선방향 트랙션의 분포가 구름의 영향으로 인해 접촉 중심을 기준으로 좌우 대칭이 아니며, 접촉중심이 작고 접촉 전부(leading)와 후부(trailing)영역에서 크게 나타난다. 마찰계수변화에 따라 접선방향 힘이 영이 될 때인 순수 구름접촉의 속도도 변화하였다.

Fig. 5 는 순수 구름접촉 시 마찰계수변화에 따른 접촉압력의 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 마찰계수가 변화함에 따라 접촉압력의 변화는 거의 없었고, 접촉압력은 접촉중심에서 가장 큰 값을 나타내었다.

Fig. 6 은 마찰계수 변화에 따른 상대 미끄럼의 분포를 해석한 결과이다. 마찰계수 1.0 일 때를 제외하고 마찰계수변화에 따라 상대 미끄럼의 변화는 거의 없었다.

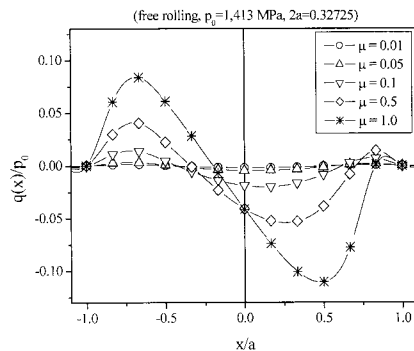


Fig. 4 Tangential traction along contact surface with different friction ($V=10$ mm/s, free rolling)

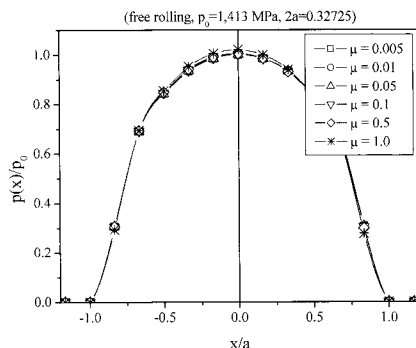


Fig. 5 Contact pressure along contact surface with different friction ($V=10$ mm/s, free rolling)

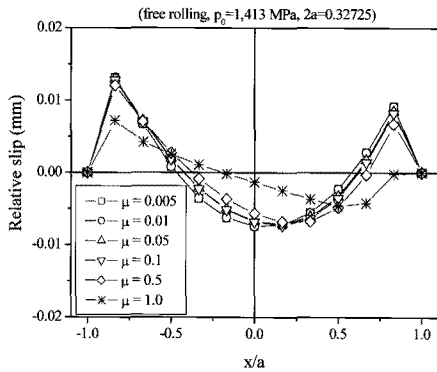


Fig. 6 Relative slip along contact surface with different friction ($V=10$ mm/s, free rolling)

구름접촉 시 슬립율(slip rate)에 따라 정상상태 (Steady state rolling)에서의 접촉응력, 슬립량 등의 접촉변수들은 변화하게 된다. 슬립율은 볼러의 접선속도 차이(V_1-V_2)를 평균 접선속도($0.5(V_1+V_2)$)로 나눈 값이며, 크리피지(creepage)라고도 한다. Fig. 7 은 슬립율에 따른 접선방향 트래クション의 변화를 해석한 결과이다. 해석은 접선방향 속도 10 mm/s, 마찰계수는 0.1 을 적용하였다. 그림과 같이 슬립율이 커질수록 접선방향 트래クション은 증가한다. 앞의 순수 구름접촉 해석 결과와 비교하면, 슬립율이 0.1 ~ 0.2 %에서 접선방향 트래クション 분포의 방향이 변화하므로, 이 슬립율 부근에서 순수 구름접촉이 발생함을 알 수 있다. 또한 슬립율이 0.3~0.4 %일 경우 접선방향 트래クション의 크기는 접촉영역의 후부(trailing edge)가 전부(leading edge)보다 큼을 알 수 있다. Fig. 8 은 슬립율 변화에 따른 접촉면에서의 슬립량을 해석한 결과이며, 슬립율이 증가할수록 슬립량 및 슬립영역이 증가하였다. 슬립율 0.3 %일 때 접촉 중심영역에서 점착(stick) 현상이 발생하고 미세한 슬립은 접촉영역의 가장자리 부근에 타원형으로 분포하였다.

접촉압력의 경우 슬립율 변화에 따라 약간의 차이는 있지만, 최대 접촉압력의 크기에 비교하여 거의 차이가 없었다. 슬립율 증가에 따라 접촉표면에 발생하는 접촉응력은 Fig. 9 와 같이 약간씩 증가하며, 접촉영역 선단(leading)이 후단(trailing)보다 약간 큰, 비 대칭의 분포를 나타내었다. Fig. 10 은 슬립율 변화에 따른 접선력의 변화(creep curve)를 나타낸 그림이다. 그림과 같이 슬립율이 증가

함에 따라 접선력은 증가하고, 전체 슬립이 발생할 경우 일정해진다.

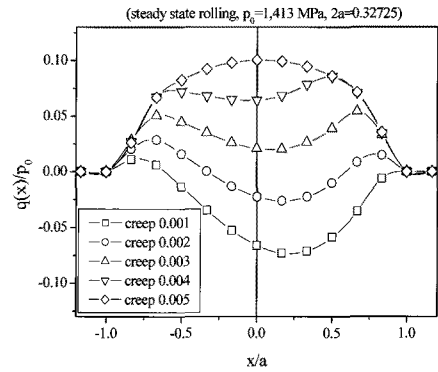


Fig. 7 Tangential traction along contact surface with different creep ratio ($V=10$ mm/s, $\mu=0.1$)

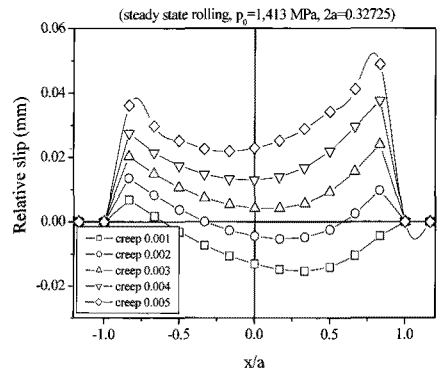


Fig. 8 Relative slip along contact surface with different creep ratio

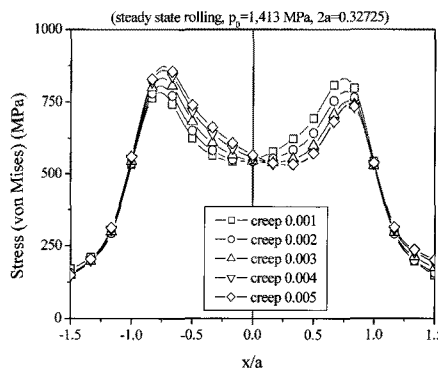


Fig. 9 Contact stress along contact surface with different creep ratio

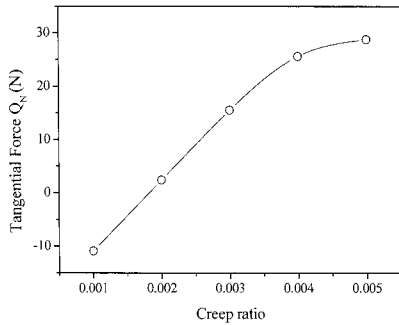


Fig. 10 Tangential Force for steady state rolling contact with different creep ratio

3.2 탄성체간 구름접촉

두 탄성체 원통의 구름접촉 유효요소모델을 이용하여 정지상태와 구름접촉 상태가 되었을 때 접촉표면에 발생하는 접촉응력을 해석하였다. 접촉면의 마찰계수는 0.1 을 적용하였고, 구름접촉은 정지상태에서 정상상태가 될 때까지의 과도해석(transient analysis)을 수행하였다.

탄성체인 두 개의 원통이 구름운동을 하지 않은 정지 상태에서 수직하중(P)이 작용하고 미끄러지지 않을 정도의 접선방향 하중(Q=0.75μP)이 작용할 때, 접촉압력의 분포는 Fig. 11(a)와 같이 접촉중심이 가장 큰 타원형의 분포를 나타낸다. 또한 접선방향 트랙션의 분포는 Fig. 11(b)와 같이 접촉중심이 작고 바깥쪽으로 갈수록 커졌다가 작아지는 분포를 나타낸다. 이와 같은 현상은 접촉면 중앙에는 점착현상이 발생하고, 바깥쪽에는 미끄럼현상이 발생하기 때문이다. 따라서 점착영역과 미끄럼영역의 경계면에서 접선방향의 트랙션이 가장 큰 값을 나타낸다.

Fig. 12 는 수직하중과 접선방향 하중이 작용한 상태에서 구름운동을 시작하여 정상상태(steady state)가 되었을 때 접촉면의 접촉응력 및 미끄럼 해석결과를 나타낸다. 접촉압력 분포는 정지 상태와 동일하게 접촉 중심이 가장 큰 타원형의 분포를 나타내며, 구름접촉이 발생하더라도 접촉압력은 큰 변화가 없었다. Fig. 12(a)와 같이 정상상태의 접선방향 트랙션은 구름접촉 영역의 전부(leading edge)에서 작고 후부(trailing edge)에서 크게 나타난다. 이 결과는 구름접촉이 발생할 경우 접촉영역의 전부에서는 점착현상이 발생하고, 후부에서 미끄럼이 발생하기 때문이며, Fig. 12(b)의 접촉영역의 미끄럼량 분포 해석결과에서 잘 나타나

고 있다.

구름접촉 시 접촉응력(von Mises stress)의 분포는 Fig. 12(c)와 같이 접촉영역 전부에서 가장 큰 값을 나타낸다. 구름접촉이 발생할 경우 정지 상태와 비교하여 접촉영역 전부의 접촉응력은 약 9% 증가하며, 접촉영역 후부의 접촉응력은 약 9% 감소하였다.

탄성체간 구름접촉(rolling contact of similar cylinder)시 접선방향 트랙션 분포는 탄성체와 강체의 구름접촉(rolling contact of dissimilar cylinder)과는 다른 분포를 나타낸다.¹⁰ Fig. 13 은 슬립율 0.1%, 정상상태에서 탄성체간 구름접촉과 탄성체와 강체의 구름접촉시 접선방향의 트랙션 분포를 해석, 비교한 그림이다. 탄성체간 구름접촉은 접촉영역 전부에서 점착현상이, 후부에서 미끄럼현상이 발생하므로 접촉 후부(x/a=0.5 위치)에서 접선방향 트랙션이 크게 나타난다. 그러나, 탄성체와 강체가 구름접촉 할 경우 전부와 후부에서 동시에 슬립이 발생하고 트랙션의 방향도 서로 반대가 된다. 이것은 탄성체간의 접촉에서는 두 탄성체가 동시에 변형이 발생하는 반면, 탄성체와 강체의 접촉에서는 탄성체만 변형이 발생하기 때문이다. 따라서 탄성체와 강체 접촉으로 구름접촉 해석을 수행할 경우 탄성체간의 접촉과 비교하여 접촉응력의 분포가 달라지므로 주의가 필요할 것으로 판단된다.

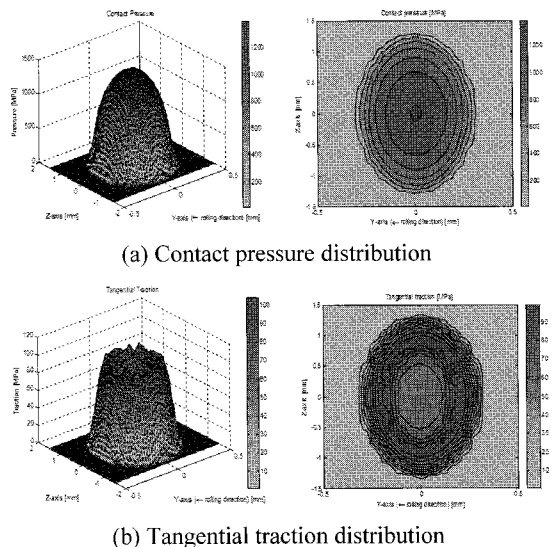
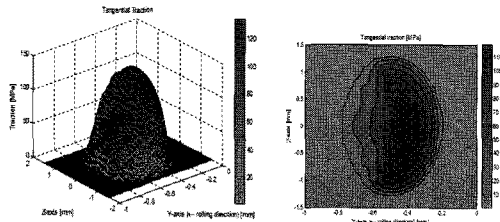
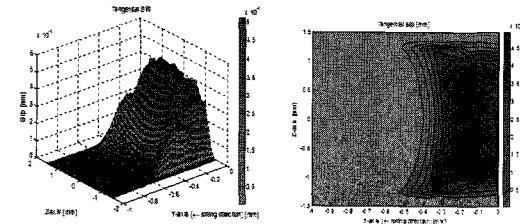


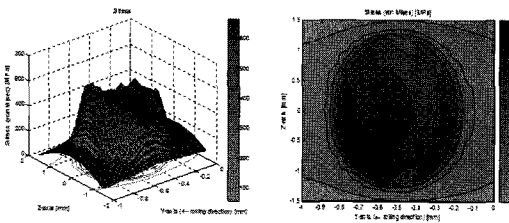
Fig. 11 Three-dimensional stresses on contact surface with constant tangential load ratio $Q/\mu P=0.75$ and stationary contact



(a) Tangential traction distribution (steady state rolling)



(b) Micro-slip distribution



(c) Contact stress (von_Mises) distribution

Fig. 12 Three-dimensional stress on contact surface with constant tangential load ratio $Q/\mu P=0.75$ and steady state rolling contact

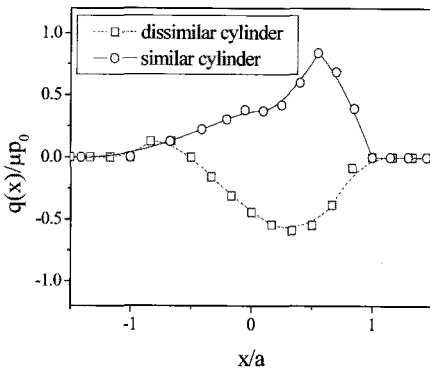


Fig. 13 Comparison of tangential traction in the rolling contact of dissimilar cylinder and similar cylinder

4. 결론

탄성체와 강체, 탄성체와 탄성체의 구름접촉이 발생하여 정상상태가 되었을 때, 접촉압력 및 접

촉응력 등을 해석하기 위하여 3 차원 유한요소해석 모델을 구축하였다. 이 모델을 이용하여 구름 접촉 해석을 수행하였고 접촉변수 변화에 따른 접촉응력의 변화 등을 분석하였다.

탄성체와 강체가 순수 구름접촉 할 경우 마찰계수 변화에 따라 접촉응력의 변화는 거의 없지만, 접선방향 트랙션은 마찰계수가 커짐에 따라 증가한다. 또한, 슬립율이 커짐에 따라 접촉응력의 변화는 거의 없지만 접선방향 트랙션은 증가하며 전체슬립이 발생할 경우 일정해 진다.

탄성체와 탄성체의 원통이 구름접촉을 할 경우 접촉압력은 타원형의 분포를 나타낸다. 접선방향 트랙션 분포는 탄성체와 강체의 구름접촉과 다른 분포를 나타낸다. 즉, 탄성체 간의 구름접촉이 발생할 경우 접선방향 트랙션은 접촉영역의 전부에는 점착현상이 발생하기 때문에 작아지고, 후부에는 미끄럼이 발생하기 때문에 커지게 된다. 또한, 접촉응력은 접촉영역 전부에서는 증가하고 후부에는 감소하게 된다.

참고문헌

1. Jun, H. K., Lee, D. H., Seo, J. W. and Kwon, S. J., "A Review of Fatigue Damage by Wheel-rail Rolling Contact," J. of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 4, pp. 35-41, 2008.
2. Turnia, J., Sinclair, J. and Perez, J., "A Review of Wheel Wear and Rolling Contact Fatigue," Inst. Mech. Eng., F: Rail Rapid Transit, Vol. 221, No. 2, pp. 271-289, 2007.
3. Pau, M., Aymerich, F. and Ginesu, F., "Distribution of Contact Pressure in Wheel-rail Contact Area," Wear, Vol. 253, No. 1-2, pp. 265-274, 2002.
4. Carter, F. W., "On the Action of a Locomotive Driving Wheel," Proceedings of Royal Society, Series A, Vol. 112, No. 760, pp. 151-157, 1926.
5. Johnson, K. L., "The Effect of a Tangential Contact Force upon the Rolling Motion of an Elastic Sphere on a Plane," ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 25, pp. 339-346, 1958.
6. Kalker, J. J., "The Computation of Three-dimensional Rolling Contact with Dry Friction," Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 1293-1307, 1979.
7. Telliskivi, T. and Olofsson, U., "Contact Mechanics

- Analysis of Measured Wheel-rail Profiles using the Finite Element Method,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 215, No. 2, pp. 65-72, 2001.
8. Choi, H. Y., Lee, D. H., You, W. H. and Lee, J. S., “Wheel-rail Contact Analysis considering the Deformation of Wheel and Axle,” J. of KSPE, Vol. 27, No. 8, pp. 20-27, 2010.
 9. Hibbit, Karlson & Sorensen Inc., “ABAQUS user's and theory manual, Version 6.4,” 2003.
 10. Johnson, K. L., “Contact Mechanics,” Cambridge University Press, 1985.