

차륜과 레일 사이의 접촉응력에 관한 트라이볼로지적 해석 Tribological Approach on the Stress Distribution of Wheel-Rail Contact

황재용* · 김기환** · 김청균*

*홍익대 트라이볼로지 연구센터 **한국철도기술연구원

This paper presents the numerical results of the stress analysis of wheel-rail contact problems. Two models which have straight and tapered(1:20) contact geometries between the wheelset and rail are analyzed using the finite element approach. From the simulation results we found that the tapered geometry of wheel-rail contact base line showed very stable contact stress distributions for a whole contact position between the wheel and rail in a curved rail section. The FEM computed results may present an optimized geometry of wheel-rail contact in a high-speed railway system.

Key words : Wheel-rail contact, Contact stress, Gauge corner, Finite element method

1. 서론

실용화된 운반기계중에서 가장 오랜 역사를 가지고 있는 철도차량은 제2차 세계대전을 계기로 대량 운송체계의 총아로 발전하게 되었다. 그러나 각국에서는 경제개발정책을 추진하면서 기존 도로의 포장과 고속도로를 건설하였고, 자동차 산업에 대한 적극적인 투자로 운송기계 산업 패턴도 크게 변화하였다. 철도산업은 자동차나 항공기에 비하여 상대적으로 대량 수송의 장점을 갖고 있으면서도 자동차의 편의성과 임의 이동성 때문에 인력과 물자 수송면에서 서서히 퇴조하게 되었다.

철도차량은 속도면에서 항공기에 비하여 뒤지고, 편의성과 임의 이동성에서는 자동차에 비하여 떨어지나, 대량 수송을 통한 원가절감이라는 측면에서 보면 여타 수송체계에 비하여 아직도 비교 우위에 있다. 철도차량이 현대 사회에서 수송이라는 서비스 영역을 확보하고 발전시키기 위해서는 기존의 대량 수송능력과 안전성에 추가하여 고속화라는 돌파구로 현재의 문제점을 타개할 필요성이

제기되었다.

철도에서 가장 중요한 구성요소중의 하나는 철도망을 어떻게 구성하느냐 하는 문제와 속도와의 경쟁이다. 안전하게 설치된 레일과 회전하는 바퀴가 원활하게 상호 운동작용을 함으로써 철도차량은 이동하게 된다. 레일과 차륜사이에는 차량하중과 속도에 의한 접촉압력, 미끄럼 비(Slip ratio), 습기정도, 대기오염 정도, 레일과 차륜의 접촉표면경도와 이물질의 오염정도 등에 따라서 접촉면의 마멸 발생과 이에 따른 레일의 정상부, 게이지면과 차륜의 플랜지부 형상을 변화시키게 되어 진동과 소음 등을 유발하고, 브레이크 시스템 제동력에 영향을 주게 되며, 궁극적으로는 레일과 차륜을 교체해야 하는 단계로 발전하게 된다.

이러한 측면에서 차륜과 레일사이의 상대 접촉운동면에 대한 트라이볼로지적 접촉거동 특성 해석은 대단히 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 차륜과 레일사이의 접촉속도가 고속화되면서 특이하게 발생할 수 있는 접촉응력 문제에 대한 연구

를 수행하고자 한다.

2. 차륜과 레일의 접촉형태

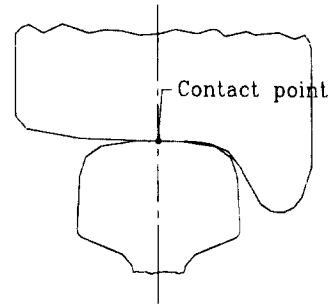
철도 차량이 일직선 레일을 주행할 때는 차륜의 평행부와 레일의 정상부가 만나기 때문에 레일의 정상부에서 발생하는 주행방향(Rolling direction)과 가로방향(Transverse direction)의 마멸문제가 중요시 되고 있다. 그러나 차량이 곡선 레일(Curved rail)을 통과해야 하는 경우는 레일과 차륜의 접촉 위치가 레일의 곡률 반경에 따라서 점차로 변하게 된다[1].

레일과 차륜의 접촉 초기에는 Fig. 1(a)와 같이 중립축에서 균형있게 접촉하는 패턴을 보여주고 있고, 차량이 200m의 곡률반경을 갖는 레일의 곡선부를 지나게 되면 접촉점은 Fig. 1(b)와 같이 차륜 플랜지(Wheel flange)로 접촉점이 이동하며, Fig. 1(c)와 같이 곡률반경이 작아질수록 차륜 플랜지의 목부분(Throat section)과 레일의 어깨부(Shoulder section)가 서로 접촉하게 된다. 차량이 곡선 레일부를 지나서 다시 직선 레일부로 돌아오게 되면 차륜과 레일의 접촉은 Fig. 1(a)와 같은 상태로 돌아가게 된다.

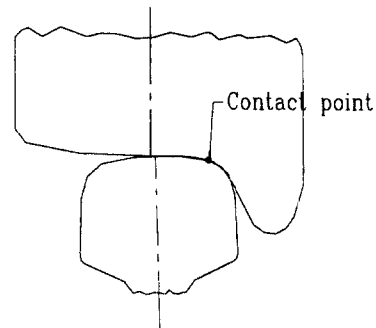
여기서 레일 정상부에서의 접촉은 굴림마찰이 주종을 이루기 때문에 피로마멸에 의한 레일 파손이 관심의 대상이고, 레일의 게이시 코너 지역에서는 굴림 마찰과 미끄럼 마찰이 공존하는 구역으로 레일의 마멸문제를 정확하게 규명하기 위해서는 궁극적으로 마찰열 문제를 동시에 고려해야 한다.

Clayton과 Allery[2]는 금속학적 측면에서 직선 레일의 주행 접촉면(Running surface)에서 발생하는 마멸을 실제로 사용한 레일을 가지고 표면하층에서 변형된 소재(Plastically deformed materials)에 대한 연구를 수행하였다[3,4]. 이들의 연구에 의하면 레일의 접촉표면 정상부로부터 약 0.5mm 깊이 부근에서 변형이 크게 발생되고, 게이시 마찰면에서는 표면하층 약 1mm 깊이에서 소성변형이 발

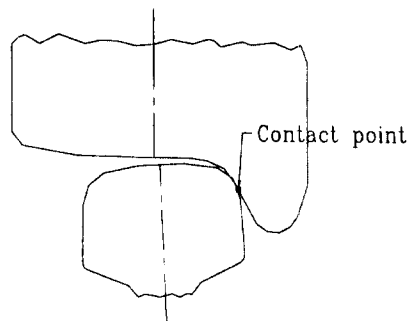
생되고 있음을 알게 되었다. 이것은 레일과 궤도 사이에서 발생하는 마멸문제가 부식에 주로 의존한다는 기존의 연구결과와는 대치되는 내용이다. 이 결과는 오히려 레일과 궤도 사이의 전형적인 접촉응력 해석 결과와 일치하는 내용으로 접촉 표면하에서 최대 접촉응력을 받고 있음은 레일의 파손/마멸과 밀접한 관계가 있다는 사실을 증명하는 연구결과이다.



(a) Straight track



(b) Curved track with 200m radius



(c) Curved track with 50m radius

Fig. 1 Rail-wheel contact position as the wheel passes through a curved rail.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3-1. 유한요소해석 모델

실제의 철도차량에서 차륜과 레일 사이의 트라이볼로지적 접촉거동 문제를 이론적으로 해석하기에는 접촉표면의 형상이 비대칭이고, 복잡하기 때문에 대단히 어렵다. 그래서 본 연구에서는 고속철도용 차륜과 레일의 접촉응력 문제를 유한요소해석 기법으로 UIC 60 모델을 2차원적으로 해석하고자 한다. 본 연구에서 사용한 차륜과 레일의 형상은 고속전철에서 널리 사용하는 UIC 60 모델(Fig. 2)과 NF F01 133 모델(Fig. 3)이다.

차륜과 레일 사이의 접촉응력 문제를 수치적으로 해석하기 위한 두가지의 유한요소망 모델은 축대칭을 갖는 2차원 모델로 Figs. 4(a)와 5(a)에서 각각 보여주고 있다. 차륜과 레일의 접촉거동 문제를 유한요소법으로 해석하기 위한 시뮬레이션 데이

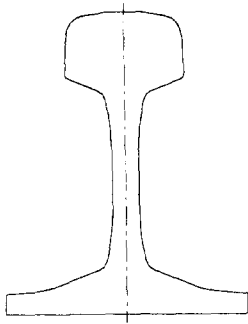


Fig. 2 Rail (UIC 60) profile.

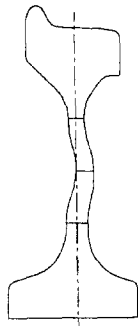


Fig. 3 Wheel (NF F01 133) profile.

타는 Table 1에서 주어지고, 엄밀해를 구하기 위하여 차륜과 레일의 접촉부는 보다 미세한 요소로 재구성하였다.

레일의 마멸이 접촉응력에 의하여 영향을 받고 있다는 사실[5]을 고려하면 레일과 차륜의 접촉부에서 응력분포 관계를 엄밀하게 해석하는 것이 매우 중요하다. 차륜/레일에서의 접촉하중과 접촉 위치의 변화는 접촉부위의 형상에 따라서 많은 변화가 예상된다.

3-2. 하중 및 경계조건

차륜과 레일에 가하는 축하중은 증가하는 추세에 있으며, 본 연구에서는 고속철도 차량에 가하는 단위 축하중을 8,500kg으로 하고, 이것을 기준 하중으로 잡아서 하중비를 100%으로 하였다. 또한 레일에 가하는 하중 8,500kg 대비 50%(4,250kg), 75%(6,327kg), 100%(8,500kg), 125%(10,625kg)의 4가지에 대한 접촉거동 문제를 해석하였다.

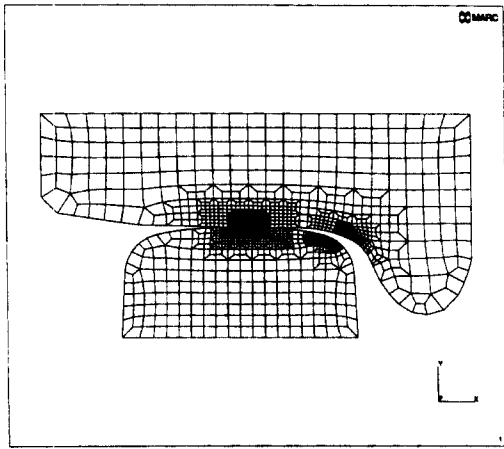
본 연구에서 사용한 차륜/레일의 해석 모델-I은 Fig. 4(b)에서 보여주는 것처럼 차륜과 레일의 기준 접촉면이 서로 평행한 경우이고, 차륜/레일 모델-II는 기준면이 1:20(2.8624°)으로 경사진 경우로 Fig. 5(b)에서 보여주고 있다. 또한 수치적 해석을 위하여 사용한 비선형 프로그램은 MARC[6]이고, 경계조건과 레일과 차륜의 물성치는 Table 2에서 제시하고 있다.

유한요소 해석시 접촉점에 하중이 가해지면 접촉응력에 의하여 변형이 발생되는데, 본 연구에서는 절점사이의 미세 접촉거리 허용치(Contact distance tolerance)가 0.01mm 이내에 있으면 접촉된 것으로 가정하였다.

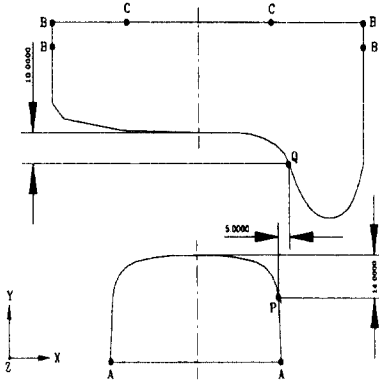
차륜과 레일 사이의 최초 접촉 위치는 레일의 정상부로부터 14mm 아래 지점 P와 차륜의 하단 중심부로부터 10mm 아래 Q점 사이의 축방향 거리가 5mm되는 지점이 서로 만날 때 처음으로 접촉이 일어난 것으로 가정하여 해석하였고, 여기서

차륜과 레일의 접촉 초기 위치와 경계조건은 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서 제시하고 있다.

여기서 레일의 위치 A-A는 지면에 고정되었고, 위치 B-B는 x 방향에 대하여 구속하였으며, 외부에서 차륜축에 가하는 하중은 위치 C-C에서 담당한다고 가정하였다. 여러 가지의 하중조건을 변화시켜 가면서 접촉응력이나 접촉면의 크기 등을 해석하고, 또한 차륜이 곡률반경을 갖는 레일을 따라서 운전될 경우를 고려하여 레일의 x 축 방향으로 차륜을 1mm씩 4mm까지 이동했을 때의 접촉응력과 접촉형상 문제를 해석하였다.

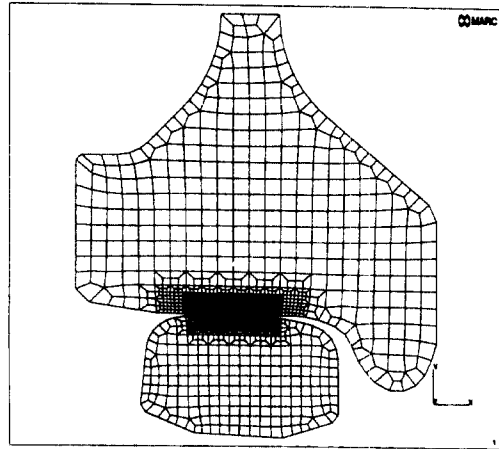


(a) Mesh generation

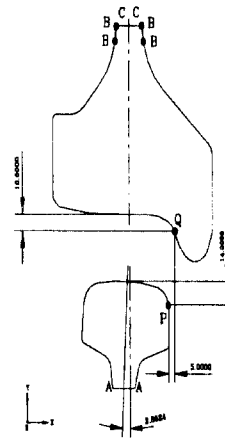


(b) Parallel contact geometry

Fig. 4 Finite element meshes in a FEM computation for Model I.



(a) Mesh generation



(b) Tapered contact geometry(1:20)

Fig. 5 Finite element meshes in a FEM computation for Model II.

Table 1. Material properties of wheel-rail contact for a FEM computation

Material properties	Numerical values	
	Wheel	Rail
Young's modulus E , Pa	2.1×10^{11}	2.1×10^{11}
Poisson ratio ν	0.3	0.3
Mass density, kg/m^3	7,850	7,850
Yield strength σ_y , Pa	8.8×10^5	8.8×10^5

Table 2. Simulation data for a FEM computation

Wheel-rail model	Model I	Model II
No. of element	2,652	1,925
No. of node	2,799	2,050
Element mode	4-node arbitrary quadrilateral, isoparametric element	
Contact distance tolerance, mm	0.01	0.01
Node distance, mm	0.23	0.56
Axle load, kg	8,500	
Coef. of friction	0.25	

4. 해석결과 및 고찰

고속전철에서 차륜과 레일 사이의 접촉문제를 해석하기 위하여 접촉 기준선을 평행하게 설정한 차륜/레일의 접촉모델-I(Fig. 4)과 기준선을 1:20으로 경사지게 잡은 차륜/레일의 접촉모델-II(Fig. 5)의 두가지에 대한 트라이블로지적 접촉문제를 유한요소법으로 해석하였다.

Fig. 6은 평행한 접촉조건을 갖는 모델-I과 같은 레일/차륜 접촉문제에 대한 접촉응력을 해석한 결과로 하중비가 증가할수록 접촉응력과 접촉면적이 증가됨을 보여주고 있다. 또한 Fig. 7에서는 1:20으로 경사진 모델-II에 대한 유한요소해석 결과로 Fig. 6의 계산 결과에 비하여 접촉길이가 증가하는 대신에 국부적인 접촉응력은 2배 이상 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 동일한 경계조건에 대하여 Fig. 4(b)의 모델-I과 같이 차륜과 레일의 기준 접촉선이 서로 평행한 것보다는 Fig. 5(b)의 접촉모델과 같이 일정한 경사가 있도록 레일을 설치하는 것이 효과적이라는 사실이다.

이러한 계산 결과를 확인하기 위한 방법으로 여러 가지 하중비에 대하여 차륜을 최초의 접촉위치(0mm)에서 x방향으로 0mm~4mm까지 1mm씩 이동시켜 가면서 접촉응력 문제를 해석하였다. 평행한 접촉선을 갖는 차륜/레일의 접촉모델-I에서 하

중비가 100%(8,500kg)인 경우에 대한 계산결과를 Fig. 8에서 제시하고 있다. 이 결과에 의하면 x방향(축방향)의 접촉위치에 따라서 최대 접촉응력은 크게 감소하는 경향을 보여주고 있다.

하중비(50%, 75%, 100%, 125%)를 증가시켜 가면서 접촉거동 상태를 계산한 Fig. 9의 결과에 의하면 차륜과 레일의 접촉면에서 하중비가 증가할수록 최대 접촉응력은 증가한다. 또한 레일의 접촉 표면에서 발생하는 최대 접촉응력은 차륜을 x방향으로 이동시킴에 따라서 점차로 감소하는 계산 결과를 보여준다. 이러한 결과는 모델-I의 경우 기준 위치에서 차륜과 레일이 접촉할 경우 차륜의 기울기가 변하는 부분과 레일의 곡면의 접촉이 발생하여 그 부분에 응력집중 현상이 발생하나 차륜이 곡률반경을 갖는 궤도를 따라서 이동함에 따라 점차로 곡면과 평면의 접촉으로 변하게 되어 접촉면적이 증가하고, 그에 따라서 접촉응력이 감소하게 된다.

반면에 기준 접촉선을 1:20으로 경사시킨 차륜/레일의 접촉모델-II에 대한 연구결과에 의하면 접촉 하중비를 증가시킬수록 접촉응력은 약간 증가하나 모델-I에 비하면 증가율이 대단히 낮다. 또한 주어진 접촉하중에 대하여 차륜의 접촉위치를 0, 1, 2, 3, 4mm로 이동시켜 가면서 접촉특성 문제를 고찰하면 접촉응력이나 접촉면적의 변화 정도가 Fig. 10에서 보여준 것처럼 대단히 작다는 사실이 특이하다. 즉, 1:20의 경사도를 갖는 레일에서는 차륜과 레일의 접촉위치를 변화시켜도 레일에서 발생하는 최대 접촉응력은 거의 일정한 결과를 보여준다. 이것은 레일의 접촉면에서 1:20의 경사로 인한 접촉면적의 크기가 비교적 균일해지기 때문에 차륜과 레일사이가 평행한 경우보다는 경사진 설계가 더욱 유리함을 알 수 있다.

철도차량에서 차륜과 레일 사이의 마찰조건은 기준선의 경사도를 어느 정도로 설계하느냐가 대단히 중요한 설계변수가 된다는 사실을 본 연구에

서 보여주고 있다. 레일의 경사도를 최적화 시킨다면 접촉면에서의 응력분포를 균일하게 유지하면서 접촉면적은 크게 할 수 있다. 결국 레일의 경사도에 관련된 최적화 설계(1:20 부근)는 차륜과 레일이 서로 접촉하는 전구간에 걸쳐서 접촉응력은 작으면서도 균일해지므로 차륜과 레일의 마멸문제는 크게 완화시킬 수 있게 되고, 레일과 차륜의 수명은 증가하게 된다. 이러한 측면에서 차륜과 레일 사이의 접촉응력 거동문제 해석을 통한 설계 파라메타의 최적화 설계는 중요한 의미를 갖는다.

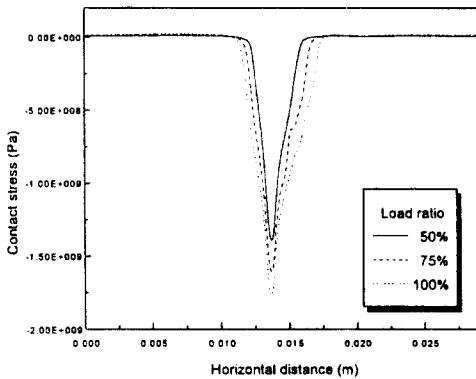


Fig. 6 Contact stress as a function of horizontal distance from the rail head center along the wheel-rail contact surface for Model I.

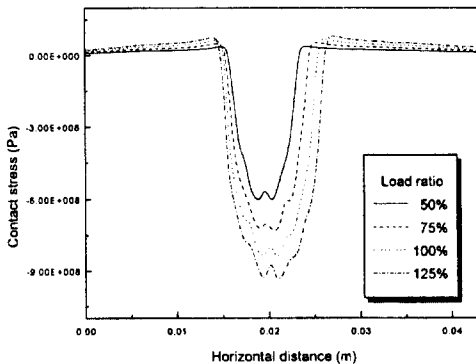


Fig. 7 Contact stress as a function of horizontal distance from the rail head center along the wheel-rail contact surface for Model II.

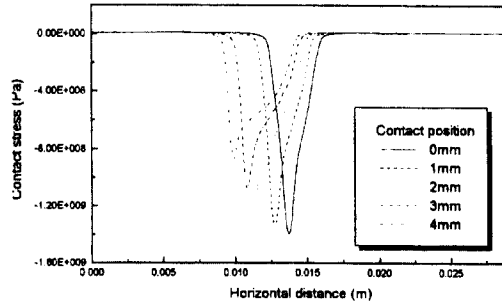


Fig. 8 Contact stress as a function of horizontal distance from the rail head center along the wheel-rail contact surface for Model I with load ratios, 100%.

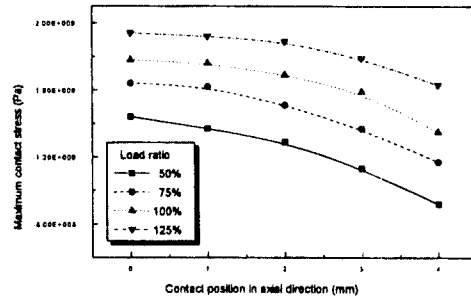


Fig. 9 Maximum contact stress as a function of contact position in axial direction from the rail head center along the wheel-rail contact surface for Model I.

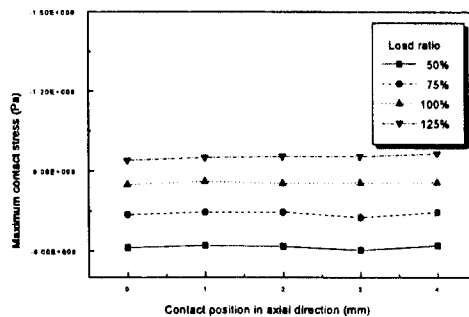


Fig. 10 Maximum contact stress as a function of contact position in axial direction from the rail head center along the wheel-rail contact surface for Model II.

5. 접촉력과 마멸율

레일과 차륜의 접촉면에서 발생하는 마멸문제에 대한 초창기의 연구는 경제적인 측면에서 접근하려는 성격이 강하기 때문에 차량의 안전 운행과는 약간 거리가 있었다. 마멸문제는 1950년대 영국의 철도망에 관련된 실제적인 데이터를 체계적으로 보고한 이후로 많은 관심을 갖기는 하였으나[3,4], 당시에는 마멸의 대부분이 부식(Corrosion)에 기인한 문제라고 보는 견해가 우세하였다. 그러나 최근의 철도에서는 운행조건의 가혹화, 즉 고속화와 고하중화는 초기의 마멸에 의한 국부적인 압축응력의 증가와 탄소성 변형에 의한 피로마멸이나 파괴로의 천이가 보다 큰 문제점으로 제기되고 있다.

레일에서 마멸이 일어나는 부위를 관찰하면 정상부(Rail head)와 게이지 접촉면(Gauge surface), 그리고 차륜에서는 레일과 접촉하는 트레드(Tread)와 플랜지(Flange)가 있다. 궤도의 직선과 곡선 정도에 따라서 레일과 차륜사이의 접촉위치가 변하고, 이에 따른 마찰과 마멸의 발생 정도가 달라진다.

최근 철도 차량에 가해지는 액슬 하중(Axle load)이 39톤 정도로 차량의 평균 하중은 점진적으로 증가하는 추세에 있으며, 이에 따른 레일과 궤도 사이의 마멸 문제도 중요한 현안으로 대두되고 있다.

기존의 연구결과에 의하면 경도가 300HB 이상 되는 탄소강 레일 소재에서 보면 접촉력(Contact pressure)이 증가하면 마멸율은 완만하게 상승하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 11은 크롬과 몰리브덴의 합금강을 레일 소재로 사용한 경우에 대한 마멸율 결과로 접촉하중이 증가하면 초기에는 완만하게 증가하다가 1,000MPa 이상이 되면 마멸율은 비교적 비선형적으로 상승하는 경향을 보여주고 있다. 차륜에 걸리는 하중을 증가할수록 레일에서 발생하는 마찰열은 급격하게 증가될 것으로 생각된다.

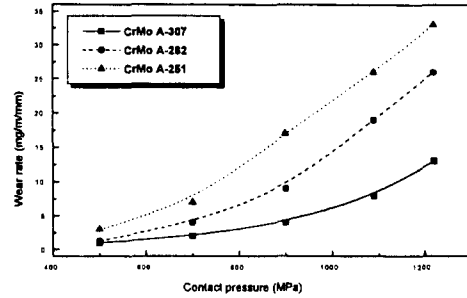


Fig. 11 Non-linear wear rate as a function of contact pressure.

6. 결론

레일에 작용하는 반복 고하중에 의한 접촉응력이나 표면경도 변화는 분명히 마멸율에 연관이 있으나, 이들의 상관 관계가 정확하게 아직은 해결되지 않고 있다. 차륜이 회전함에 따라서 발생하는 굴림방향의 마멸손상보다는 가로방향의 접촉응력 집중에 따른 레일의 파단 가능성 문제가 더욱 심각하기 때문에 이와 같은 접촉응력 문제에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.

철도차량에서 차륜과 레일사이에서의 마찰조건은 기준선의 경사도를 어느 정도로 설계하느냐가 대단히 중요한 설계변수가 된다는 사실을 본 연구에서 보여주고 있다. 레일의 경사도를 최적화 시킨다면 접촉면에서의 응력분포를 균일하게 유지하면서 접촉면적은 크게 할 수 있으므로 차륜과 레일의 마멸문제는 크게 완화시키게 되고, 레일과 차륜의 수명은 증가될 수 있다.

차륜과 레일의 실제적인 접촉문제는 건조마찰 또는 경계마찰을 고려해야 결과의 신뢰도를 보장할 수 있으므로 Hertz 탄성접촉 해석보다는 마찰접촉 조건을 고려한 트라이볼로지적 접근방법이 타당하다. 또한 철도차량이 고속으로 운전하게 되면 레일의 정상부와 게이지 접촉면에서는 특히 마찰열에 의한 열변형 거동과 이에 따른 마멸문제가 중요하므로 관련 연구를 계속 진행할 예정이다.

참고문헌

1. Markov, D., "Laboratory Tests for Wear of Rail and Wheel Steels," *Wear*, Vol. 181-183, pp.678-686, 1995.
2. Clayton, P. and Allery, M.B.P, "Metallurgical Aspects of Surface Damage Problems in Rails," *Can. Metall. Q.*, Vol. 21, No. 1, pp.31-46, 1982.
3. Dearden, J., "The Wear of Steel Rails : a Review of the Factors Involved," *Proc. Inst. Civil Eng.*, London, May 1954.
4. Dearden, J., "The Wear of Steel Rails and Tyres in Service," *Wear*, Vol. 3, pp.43-59, 1960.
5. Clayton, "Predicting the Wear of Rails on Curves from Laboratory Data," *Wear*, pp.11-19, 1995.
6. MARC User's Manual, Version K6.2, MARC Analysis Research Co., 1996.