곡선부에서 레일 마모저감을 위한 레일 형상 최적화

Optimization of Rail Profile to Reduce Wear of Rail in Curve

*최하영[1], 이동형[1], 송창용[2], #이종수[3]
*H. Y. Choi[1], D. H. Lee[1], C. Y. Song[2] , #J. Lee(jleej@yonsei.ac.kr)[3]
[1]한국철도기술연구원 고속철도연구본부, [2]국립목포대학교 해양시스템공학과, [3]연세대학교 기계공학과

Key words : Rail, Profile, Wear, Optimization, Genetic Algorithm

1. 서론

도시 철도의 선로에는 곡선 선로가 많은 비중을 차지하고 있고, 차륜과 레일의 접촉현상은 차륜과 레일의 손상과 차량의 거동, 진동 및 소음에 큰 영향을 미치며 곡선 선로에서 더욱 심각하다. 철도 차량의 차륜과 레일 접촉현상은 차륜과 레일의 기하학적 형상에 의해 큰 영향을 받는다. 차륜 또는 레일의 기하학적 형상을 최적화하여 위에서 언급된 문제점들을 저감하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

Smallwood[1]등은 곡선의 외측 레일상에서 구름 접촉 피로 손상의 원인이 되는 접촉 압력 감소를 위해 레일 프로파일을 수정하는 방법을 제안하였다. Roney[2] 등은 높은 응력 접촉으로부터 보호하기 위해 레일을 예방 마모된 차륜에 매칭되도록 하여 접촉 응력을 최소화하는 최적화 레일 프로파일 시리즈로 삭정하였다. 그리고 레일 형상을 제어하기 위해 측정되어야만 하는 파라미터와 이들 파라미터의 측정 기술을 제시하였다.

레일의 수명을 연장하고 유지보수비용을 절감하기 위해서 일정한 주기로 레일 삭정 작업을 수행하고 있다. 삭정은 유지보수비용 감소뿐만 아니라 탈선과 같은 사고의 위험성을 낮추는데 기여하고 있다. 현재 레일 그라인딩 실행은 대부분 현장 경험과 직감적인 추측을 통하여 개발되고 있으나, 본 논문은 급곡선에서 발생하는 차륜과 레일의 심각한 마모를 최소화할 수 있는 레일 두부의 비대칭 단면 모양을 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 방법으로 설계하고자 한다.

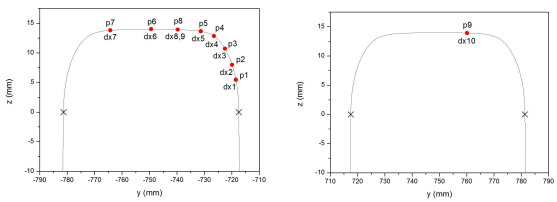
2. 레일 프로파일 최적화

도유기가 설치되어 있지 않는 곡선부 R350 구간에서 레일 마모가 더 많이 진행되고 있었다. 레일 손상에 큰 영향을 미치는 마모를 저감하기 위하여 차륜 프로파일을 변경하면 차량의 동적거동도 변화된다. 철도차량 동적 성능을 보장하기 위하여 철도 차량의 안전에 관련한 중요한 탈선, 횡압, 윤중 감소, 수직하중을 제한조건으로 정하였다. 탈선, 횡압, 수직하중은 UIC518 regulations[3] 을 참고하였으며 윤중 감소는 참고문헌[4]를 참고하였다. 차륜 프로파일의 형상 최적설계 정식화는 탈선, 횡압, 윤중 감소, 수직하중와 같은 설계 성능 제한 조건 하에서 마모가 최소화 되도록 정의 하였다.

레일 프로파일을 생성하는 변수는 계산 시간을 최소화하기 위해서 게이지 코너 부분에 접촉하는 외측 레일과 필드 부분에서 접촉하는 내측 레일은 갯수와 위치를 다르게 하였다.

외측 레일 두부의 변수인 점 1~7은 프로파일상의 고정된 위치에서 프로파일의 법선 방향으로 이동한다(dx1~dx7). 내측 레일의 변수인 점 8은 레일 볼 위에서 횡방향(dx8)와 법선방향(dx9)의 이동한다. 내측 레일 프로파일의 경우는 점 8이 기존 프로파일을 따라 횡방향(dx10)으로 이동하고 이 점 위치부터 레일 게이지 코너까지 레일의 일부를 제거하여 차륜-레일의 접촉 위치를 변화시켰다. 프로파일 생성은 근사 곡선을 생성하는 방법 중 하나인 PCHIP(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)[5] 를 이용하였다.

차륜과 레일 프로파일의 접촉 거동을 알기 위해서 철도차량 동역학 전용 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 동적성능해석을 수행하였다. 곡선부의



(a) high rail (b) low rail

Fig.1 Rail profiles

곡선반경 R350으로 하고 차량속도는 70 km/h로 하였다.

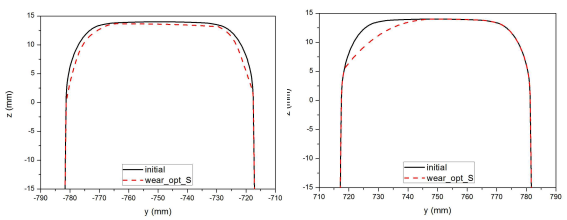
3. 결과

철도차량이 운행 중에 최적화된 레일 프로파일의 차륜-레일의 상호작용과 레일 손상을 살펴보았다. 곡선반경 R350 에 대해 최적화된 레일 프로파일은 Fig. 2 과 같다.

최적화된 내측 레일 프로파일은 내측 레일의 게이지 면으로부터 레일의 금속이 제거되어 내측 게이지 면보다 필드 사이드 영역이 더 높다. 최적화된 외측 레일 프로파일은 차륜 레일 접촉이 일어나는 내측 게이지 면의 형상이 일부 수정되었다.

최적화된 내측 레일 프로파일과 차륜의 접촉점이 내측 레일의 게이지 면으로부터 레일 금속 제거에 의해 접촉 영역이 필드 사이드 방향으로 11.56 mm 이동하여 더 작은 차륜 반경을 가진다. 기존 레일 프로파일보다 구름반경차가 약 1.8% 증가되었다. 구름반경차의 증가와 외측 레일의 개선된 게이지 코너의 형상은 차륜-레일 상호작용에 의해 발생하는 외측 레일의 횡압과 크립력, 크리피지를 감소시켰다. 이 결과가 외측 레일의 게이지 면의 마모를 감소시켰으며 Fig. 3 은 기존 레일과 최적화된 레일의 마모수를 보여주고 있다. 최적화된 프로파일의 마모수가 기존 프로파일보다 약 5.2% 감소하였다. 또한 횡압의 감소는 탈선 계수를 약 10.7% 감소시켰다.

수직 하중와 윤중 감소는 0.9%, 8.9%로 각각 감소하였다. 외측 레일 게이지 코너의 접촉 면적 감소로 접촉 압력이 약 15.1 MPa(0.7%)증가되었지만 증가량이 크지 않아 균열 발생이 기존보다 증가할 가능성 크지 않다. 수정된 내측 레일 프로파일의 접촉 응력이 약 251.8 MPa(18.9%) 증가하였지만 표면피로지수가 약 0.14에서 약 0.16으로 증가하였다. 이것으로 보아 접촉 응력의 증가가 표면피로지수에 영향을 크게 미치지 않을 것으로 생각



(a) high rail (b) low rail

Fig.2 Optimized Rail profiles

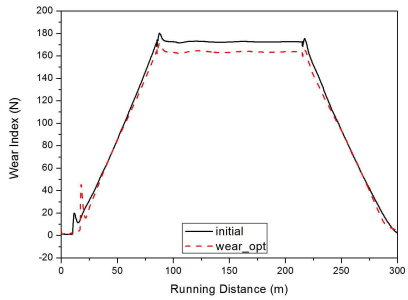


Fig.3 Wear index of wheel & rail

할 수 있다. 내측 레일의 마모수는 기존 프로파일과 비교해 거의 변화가 없었다.

3. 결론

도시철도의 선로는 많은 급곡선이 존재하며 이 급곡선에서 레일은 심각한 마모 손상이 발생한다. Vampire에 의해 동역학을 해석하고 유전자 알고리즘을 이용하여 급곡선에서의 마모 손상이 저감되도록 레일 프로파일을 최적화하였다. 따라서, 급곡선에서 레일의 마모 저감은 차륜의 마모 저감에도 영향을 줌으로 레일과 차륜의 수명이 연장될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Chattopadhyay, G., Reddy, V., and Larsson-Kråik, P.-O., “Decision on economical rail grinding interval for controlling rolling contact fatigue,” International Transactions in Operational Research, 545-558, 2005.
2. Roney, M.D., Kalousek, J., and Sobra, P., “Management of Rail Profiles Trough Rail Grinding,” International Heavy Haul Association, 84-97, 1991.
3. UIC Code 518 OR: Testing and approval of railway vehicle from the point of view of their dynamic behavior - Safty -Track fatigue - Running behaviour, 2009.
4. Lippert, S., Tengstrand, H., Andersson, E. and Stichel, S., "The effect of strong cross winds on rail vehicles," VDI Berichte NR, Vol.1568, 221-241, 2000.
5. Fritsch F. N., and Carlson R. E., "Monotone Piecewise Cubic Interpolation," SIAM J., Numerical Analysis, Vol. 17, 238-246, 1980.