

레일 용접부의 미끄럼 환경변화에 따른 마찰 및 마멸특성 연구

김청균 · 황준태 · 나성훈* · 민경주*
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터
*한국철도기술연구원

A Study on Friction and Wear Characteristics of Welded Rails Under Various Sliding Environments

Chung Kyun Kim, Jun Tae Hwang, Sung-Hoon Na*, Kyung-Joo Min*
Tribology Research Center, Hongik University
*Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents friction and wear related results of thermite and gas pressure welded rails under various environmental contact conditions. A welded rail which is fabricated by thermite welding and gas pressure one has been tested over full range of test conditions in a pin-on-disk wear testing machine. The results show that the friction coefficient and wear rates of a welded rail are heavily dependent on the contact pressures and sliding environments for two welding methods such as thermite and gas pressure weldings.

Key words : rail, corrosion, thermite welding, gas welding, water film, friction, wear

1. 서 론

철도차량은 운행중에 반드시 필요한 레일이나 휠의 마찰 접촉면에서 발생하는 마멸이 어느 정도 진행되면 교체하는 것이 가장 바람직한가, 그리고 마멸은 어떠한 원인에 의하여 발생하는가를 정확히 밝히는 것은 대단히 어려운 과제이다.

레일에 대한 마멸은 실제로 사용중인 레일에 대하여 측정한다는 것이 좋으나 실제로는 매우 어렵고, 또한 장기간에 걸쳐서 데이터를 축적해야 하는 문제점이 있다. 그러나 장기간에 걸쳐서 현장의 실제 데이터를 획득한다 할지라도 마멸의 원인을 해석하기란 대단히 어렵기 때문에 오래전부터 영국의 철도회사에서는 레일의 마멸 메카니즘 규명을 위한 소규모 실험설비를 구축하여 실험실에서

현장의 마멸문제를 해석하고 있다[1].

그동안 레일과 휠 사이의 접촉에 관련된 마찰/마멸에 대한 연구[2-4]는 많이 수행되었지만 아직도 레일 마찰부의 마멸 메카니즘이나 피로파괴(Fatigue fracture) 원인에 대한 결론을 제시하지는 못하고 있다.

레일에서의 마멸은 직선부보다는 곡선부에서 크게 발생하고, 레일과 휠에서의 마멸이 균일하게 진행된다면 심각한 문제점을 발생시키지는 않으나, 문제는 비균일성 마멸이다. 일단 레일의 마찰 운동면에서 마멸이 발생하게 되면 표면의 균일한 접촉 조건이 붕괴되고, 레일은 반복하중에 의한 피로와 균열, 크랙으로 진전되면서 레일은 파손되며, 궁극적으로 열차의 탈선으로 이어지는 사태가 발생

한다.

Dearden[5]에 의하면 사용중인 직선 레일의 두부에서 발생하는 마멸의 대부분은 부식(Corrosion)에 관련이 있다고 보고하였다.

레일에서 발생하는 또 다른 마멸형태는 주름 마멸(Corrugations or Ripples)로 레일의 곡률반경이 작고 속도가 높을수록 주름이 크게 발생한다는 사실이 밝혀졌다[6]. 레일의 주행 방향으로 레일 접촉면 주위에 소성유동에 의한 주름이 발생되면, 주름의 정상부(Corrugation head)를 연마 가공하여 레일의 형상을 다시 잡아주면 된다.

본 연구에서는 레일과 레일을 연결하기 위하여 사용된 테르밋 용접(Thermite welding)과 가스 압접(Gas pressure welding)의 두가지 용접방식에 대한 마찰/마멸특성을 실험적으로 고찰하였다. 레일과 휠 사이의 마찰접촉이 주변의 환경적 요인(물, 습증기, 눈, 모래 입자 등)에 따라서 마찰 및 마멸특성이 달라지기 때문에 이에 대한 실험을 수행하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

실험에 사용된 마멸 시험기는 Fig. 1과 같고, 미끄럼과 구름 마찰 실험을 할 수 있는 핀-디스크 마찰접촉 형태는 Fig. 2에서 보여주고 있다.

실험장치의 아래쪽 회전축에는 Fig. 2와 같은 레일 시험편을 Fig. 1의 A 구역에 설치되어 마찰 및 마멸실험을 한다. 실험장치의 상부에는 스크류 방식으로 하중을 스프링에 가하고, 이 힘은 다시 시험편에 수직으로 균일하게 시험편에 가해진다. 로드셀은 시험편에 가해지는 수직하중과 마찰력을 측정하도록 두 개가 설치되었다. 그리고 축방향의

진동도는 0.02mm 이하가 되도록 하여 실험장치의 강성도를 확보하였다.

본 연구에서는 미끄럼 마찰 속도를 0.2m/s로 고정하였는데, 이것은 속도의 변화가 마멸량이나 마멸율에 그다지 영향을 주지 않는다는 사실이다[7,8]. 특히 마찰력 변화에 따른 속도의 감소 변화를 방지하여 마찰, 마멸 특성 평가에 대한 신뢰도를 확보할 수 있도록 하기 위하여 서보 모터를 사용하였다.

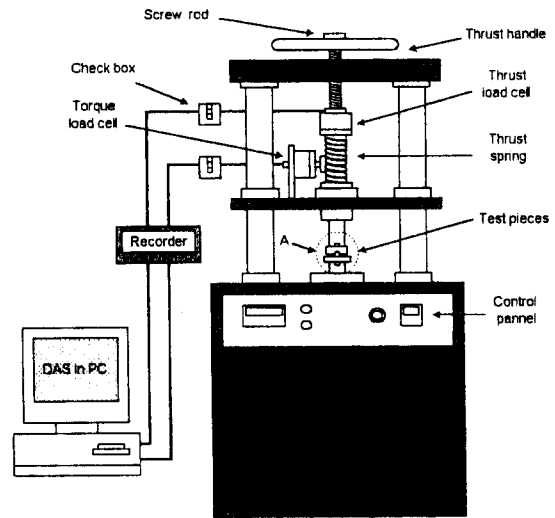


Fig. 1 Friction and wear testing apparatus.

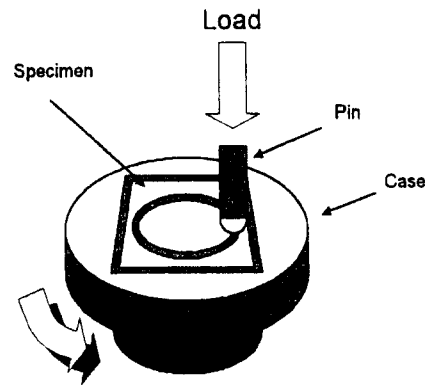
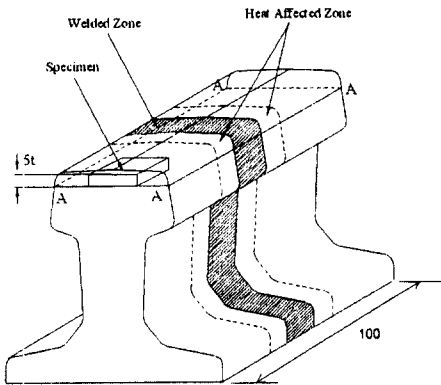


Fig. 2 Pin-on-disk contact model for a friction and wear tester.

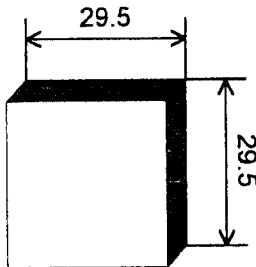
2-2. 시험편

핀-디스크 접촉방식의 마찰/마멸 시험기에
서 사용한 표준시험편은 5mm 두께를 갖는
29.5mm의 정사각형으로 Fig. 3과 같고, 핀은
10.2mm 직경의 볼이다. 레일의 마찰/마멸
시험편은 레일 두부 바로 아래의 용접부로부터
채취하였다. 시험편은 레일의 용접부를 중
심으로 좌우로부터 채취한 것으로 용접부,
열영향부, 모재부로 크게 나눌 수 있다.

실험에 사용된 시험편의 화학적 성분과 기
계적 특성은 Table 1과 2에서 각각 제시하
고 있다.



(a) Welded rail



(b) Standard specimen

Fig. 3 Sampling of the rail specimens.

Table 1. Chemical compositions

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Matrix	0.668	0.246	0.827	0.0069	0.0103	0.0025	0.026
Thermit Welding	0.578	0.189	0.892	0.0088	0.0106	0.0280	0.062
Gas Pressure Welding	0.678	0.261	0.784	0.0047	0.0118	0.0067	0.103

Table 2. Mechanical properties

	Yield Strength kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Elastic Modulus kg/mm ²	Elongation %
Matrix	0.668	0.246	0.827	0.0069
Thermit Welding	0.578	0.189	0.892	0.0088
Gas Pressure Welding	0.678	0.261	0.784	0.0047

2-3. 실험방법 및 실험조건

레일과 휠의 마찰접촉은 레일이 설치된 주
변의 환경적 요인에 따라서 마찰 접촉면이
물이나 습증기, 모래입자 등에 의하여 오염
될 우려가 많다. 그래서 레일과 휠 사이의
마찰접촉은 건조마찰 뿐만 아니라 습증기,
모래와 같은 이물질이 개입된 접촉조건에 대
한 마찰 및 마멸특성을 고찰하고자 한다.

시험편에 가한 하중은 1.5, 3, 4.5kg으로,
실제 레일에 가해지는 하중을 기준으로 설정
하여 가공된 시험편에 동일한 접촉조건으로
증가시켰고, 각각의 실험조건에 대하여 5분
간씩 지속하였다. 여기서 실험시간은 3~5분
정도면 마찰계수가 안정화에 도달하기에 충
분한 시간이다[9,10]. 여기서 제시된 결과는
시험편에 동일한 실험조건을 가한 상태에서
2~3회 반복 실험 결과치를 평균한 것으로
반복성이 높다.

마찰/마멸실험에 사용한 속도는 0.2m/s이
고, 마멸실험에서 속도를 0.2m/s 이상으로

증가시키게 되면 빠른 회전속도에 의하여 마찰면에서는 이상진동이 발생하므로 진동에 의한 마멸이 급속하게 증가하는 문제점을 갖고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 하중과 마멸율

철도차량에 가해지는 축하중의 크기는 39톤 정도로 레일과 휠의 접촉면압에 직접적인 영향을 주고, 이들 차축하중은 접촉면의 마찰 및 마멸특성과 밀접한 관계를 맺고 있다.

본 연구에서는 서로 다른 레일 용접법으로 제작된 레일소재의 마찰 및 마멸특성을 고찰하기 위하여 레일과 휠 사이에 세가지의 접촉조건을 선정하여 실험을 수행하였다.

3-2. 마찰특성 해석

레일과 휠의 저속도 미끄럼 마찰에서 접촉환경이 서로 다른 세가지 경우, 즉 건조마찰, 습증기나 수막이 있는 경우, 미세한 모래입자 등이 레일과 휠 사이에 개입된 미끄럼 마찰에 대한 마찰 및 마멸특성 실험을 수행하여 얻은 데이터를 Figs. 4~6에서 각각 보여주고 있다.

레일을 테르밋 용접과 가스압접으로 접합한 두가지 경우에 대한 마찰특성 결과는 환경적 요소가 다르다 할지라도 유사한 경향을 보여주고 있다.

건조 마찰접촉 상태에서 수행된 Fig. 4의 결과에 의하면 초기의 마찰은 가스막층과 산화막층이 깨지면서 초기 마찰계수는 급격하게 상승하고, Fig. 4(b)의 가스 압접재에서는 Fig. 4(a)의 테르밋 용접재에 비하여 마찰접촉의 안정화 단계에서도 계속 불안정한 마찰계수가 유지되고 있으며 마찰계수값 또한 테르밋 용접재에 비해 약간 높은 값을 보여주

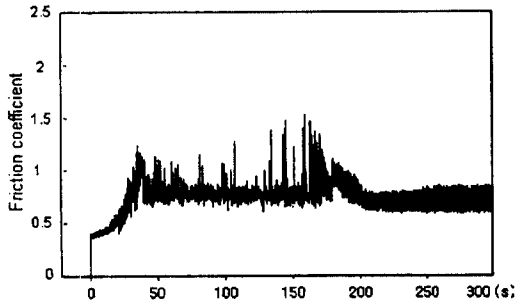
고 있다.

습증기막(Vapor film) 또는 수막(Water film)에 의한 마찰접촉 상태를 보여준 Fig. 5의 결과에 의하면 초기의 마찰력은 미끄럼 마찰면에 존재하는 습증기나 물에 의한 수막에 의하여 마찰계수가 균일하게 지속되다가 마찰열의 과도한 축적으로 인한 마찰 접촉조건이 불안정해지면서 마찰계수는 급격하게 상승하고, 차후에는 마찰계수가 초기보다는 약간 높게 유지된 상태에서 지속적으로 균일해지는 현상을 보여준다. 여기서 마찰접촉상태가 정상상태에 도달하면 접촉환경에 관계없이 유사한 마찰패턴을 보여주지만, 마찰계수가 급상승하는 천이구역에서 습증기나 수막이 깨질 경우 탈락된 마멸입자에 의하여 더욱 불안정한 마찰특성을 보여주고 있다. 이러한 천이구역에서는 수막이 깨지면서 경계마찰 또는 고체마찰로 변하고, 그결과로 마찰계수가 증가되었다가 미끄럼 마찰이 안정화되면 균일해지는 현상을 보여준다.

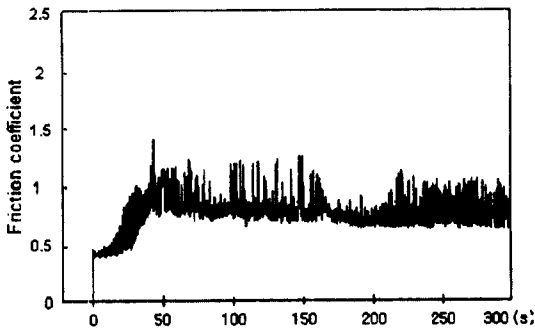
미세 모래입자가 개재된 마찰접촉 상태를 보여준 Fig. 6의 결과에 의하면 건조마찰이나 습증기 마찰의 경우에서 나타났던 초기 마찰구간이 거의 발견되지 않았고, 초기 마찰계수가 급격하게 증기되면서 마찰이 극도로 불안정해지는 마찰 특성을 나타내고 있다. 이것은 미세 모래입자가 미끄럼 마찰면에 불균일한 접촉상태를 조성하며, 이러한 표면상태의 지속은 불안정한 마찰 및 마멸을 발생시키기 때문이다. 또한 미세 모래입자의 크기가 불균일하기 때문에 비교적 큰 미세입자가 마찰면에 존재할 경우 순간적인 마찰력의 상승을 가져오며, 이러한 가혹한 상태에 의해 마찰면이 지속적으로 불안정한 상태를 유지하게 된다.

Figs. 4~6의 마찰특성 결과에 의하면 용

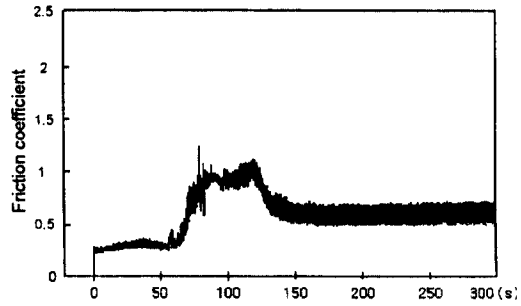
접레일에서의 초기 마찰계수는 테르밋 용접이나 가스압접에 관계없이 접촉환경에 크게 의존하고 있으며, 건조마찰과 습증기 마찰의 경우는 시간이 경과함에 따라서 마찰접촉 조건이 정상 상태에 도달하게 되고, 마찰계수는 습증기나 수막이 있는 경우에 약간 증가하지만, 균일한 안정성을 보여주는 것이 일반적이다. 그러나 미세 모래입자가 개입된 마찰의 경우, 위의 두 경우와는 달리 마찰 초기에서부터 불안정한 마찰특성을 보여주며 이러한 불안정성이 지속적으로 나타난다는 사실을 알 수 있다. 또한 가스압접재가 테르밋 용접재에 비해 전반적으로 높은 마찰계수 값을 유지하는 것을 알 수 있다.



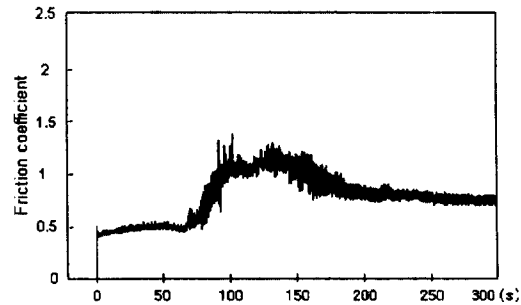
(a) Thermite welding



(b) Gas pressure welding

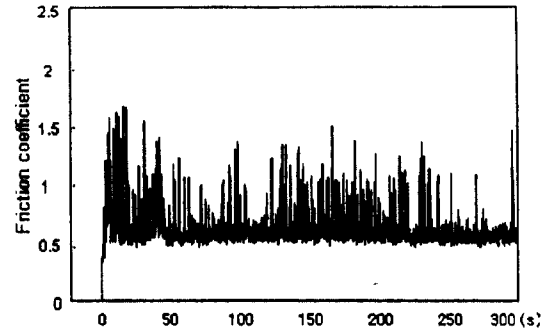


(a) Thermite welding



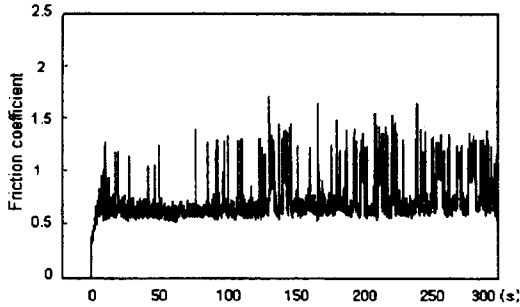
(b) Gas pressure welding

Fig. 5 Friction force of a welded rail in the vapor or water film friction contact for 1.5kg load.



(a) Thermite welding

Fig. 4 Friction force of a welded rail in the dry friction contact for 1.5kg load.



(b) Gas pressure welding

Fig. 6 Friction force of a welded rail in the sand added friction contact for 1.5kg load.

3-3. 마멸특성 해석

레일과 휠 사이에 가한 접촉하중과 환경변화(건조마찰, 습증기가 있는 경계마찰, 모래입자가 개입된 건조마찰) 습증기 마찰에 따른 마멸율의 변화를 Fig. 7에서 나타내고 있다.

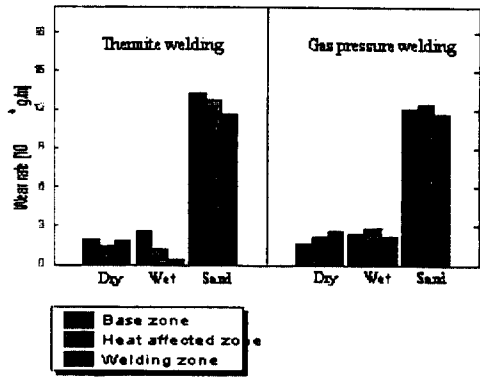
일반적으로, 레일에 가해지는 하중이 증가하면 할수록 마찰접촉 환경에 관계없이 높은 마멸율 증가를 보여주고 있다. 그러나 레일이 습증기나 물에 접촉되어 미끄럼 마찰을 하게되면 초기의 저하중에서는 물이 윤활제 역할을 수행하면서 마찰면의 윤활조건은 양호해지고, 마멸율은 건조마찰 상태에 비하여 떨어진다. 그러나 마찰면에 가한 접촉하중이 증가할수록 마찰 접촉상태가 악화되어 오히려 마멸율이 급격하게 증가하는 결과를 보여주고 있다. 즉, 레일과 휠사이의 접촉상태가 습증기, 물, 눈 등에 의하여 수막(Water film)을 형성할 시기에는 마찰계면에 긍정적인 윤활조건을 유지해주나 레일에서는 윤활유처럼 지속적으로 공급할 수 있는 환경이 아니므로

기준에 형성된 마멸입자에 의한 연삭마멸 현상이 추가되면서 마멸율은 급격하게 증대된다. 이 때 레일과 휠에 가해진 하중의 크기가 증가할수록 수막의 파손과 부식마멸의 증가를 촉진함으로써 마멸량은 크게 촉진된다.

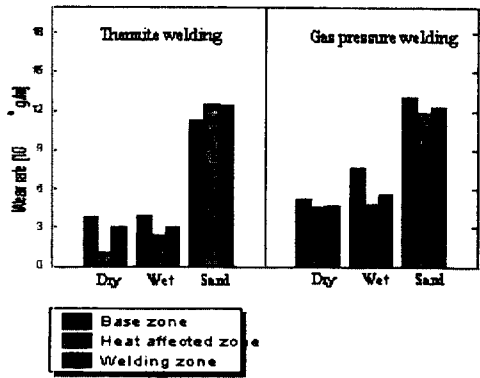
그러나 레일과 휠 사이에 미세 모래입자가 개입될 경우에 마멸율은 모든 하중에서 매우 높은 값을 가지며 건조마찰과 습증기 마찰에서 발견되었던 하중과 마멸율과의 비례성은 발견되지 않는다. 이것은 마찰면에 개입된 미세 모래입자가 마찰표면을 긁으면서 표면에 심각한 손상을 발생시키고, 이러한 손상에 의해 접촉표면은 더욱 거칠어지고, 따라서 마멸은 매우 크게 발생한다. 이 경우, 가해진 하중에 의해서라기 보다는 표면에 개입된 미세 모래입자의 개입 상태에 따라서 마멸율이 달라진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서 제시된 실험결과를 보면 마찰 환경에 관계없이 하중이 증가할수록 가스압접 레일이 테르밋 용접 레일에 비하여 마멸율은 분명하게 커지고 있음을 보여주고 있다. 이것은 가스압접이 테르밋 용접에 비해 불안정한 마찰값과 경도가 낮다는 사실을 고려할 때 마찰의 불안정이 마멸율의 증가에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

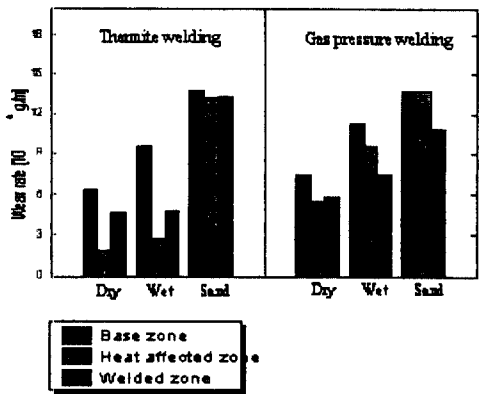
테르밋 용접의 경우 모재부, 열영향부, 용접부에서의 마멸율이 매우 뚜렷한 차이를 나타내는 것을 알 수 있으나, 가스압접의 경우는 상대적으로 균일한 마멸율을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 테르밋 용접재의 경우는 용접부의 불균일한 마멸로 레일 용접부에서는 접촉면적 차이로 인하여 피로마멸이나 크랙을 발생시킬 소지가 크다는 사실을 예상할 수 있다.



(a) 1.5kg



(b) 3kg



(c) 4.5kg

Fig. 7 Wear rate between thermite welding and gas pressure welding for various applied loads and environments.

4. 결론

테르밋 용접과 가스압접으로 제작된 시험편에 미끄럼 마찰 용접부의 환경적 조건 변화에 따른 마찰·마멸특성을 해석한 결과에 의하면 레일에 가한 반복하중이 낮을 경우 습증기나 물 등에 의한 수막은 마멸을 감소에 도움이 되지만, 하중이 증가할수록 수막에 의한 마멸율은 추가적인 연삭마멸이나 부식마멸의 급격한 증가로 부정적인 영향을 미치고 있다. 또한 미세 모래입자가 개입된 경우 마멸율은 여타 접촉환경에 비하여 마찰 표면에 심각한 손상을 발생시키지만, 용접방식이나 하중에 따라서 크게 변화되지 않음을 알 수 있다. 이것은 마멸의 발생이 하중의 증감 뿐만 아니라 레일 표면에 개재된 분순물 등에 의한 영향 또한 크다는 사실을 보여 주고 있다.

이상과 같이 레일의 마멸과 환경은 매우 밀접한 관계를 맺으며, 상기에서 지적된 것처럼 레일과 휠의 접촉환경의 문제점(습증기, 물, 눈, 모래입자 등)을 해결할 수 있는 방안으로 압축공기를 레일과 휠의 접촉부 전방에 고압으로 공급하여 이물질들을 제거한다면 마멸완화에 상당한 효과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 레일의 용접부 경도가 불균일하다든지 또는 접합상태의 불량으로 인하여 발생하는 문제점은 분명히 용접기술 향상, 표면 열처리 및 표면연삭 가공기술에서 해결책을 찾아야 레일의 안정적인 사용과 수명연장에 기여할 수 있다.

참고문헌

1. Clayton, P., Allery, M. B. P. and Bolton, P. J., "Surface Damage Phenomena in Rails. Int. J. Kalousek, R. V. Dukkkipati and G. M. L. Gladwell(eds.), Contact

- Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, University of Waterloo Press, Waterloo, 1983
2. Krause, H. and Scholten, J., "Factors Influencing the Frictional and Wear Behaviour of the Wheel/Rail System," 5th Int. Wheelset Congr., Tokyo, Paper 7, 1975
 3. Kalousek, J., Rosval, G. and Ghonem, H., "Lateral Creep and its Effect on Wear in Rail Wheel Interface," Int. J. Kalousek, R. V. Dukkipati and G. M. L. Gladwell (Eds.), Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, University of Waterloo Press, Waterloo, 1983
 4. Bolton, P. J., Clayton, P. and McEwen, I. J., "Wear of Rail and Tyre Steels under Rolling/Sliding Conditions," ASLE Trains., Vol. 25, No. 1, pp.17-24, 1982
 5. Dearden, J., "The Wear of Steel Rails and Tyres in Service," Wear, Vol. 3, pp.43-59, 1960
 6. Matsumoto, A., Yasuhiro, Sato, Nakata, M., Tanimoto, M. and Qi, Kang, "Wheel-Rail Contact Mechanics at Full Scale on the Test Stand," Wear, Vol. 191, pp.101-106, 1996
 7. Libsch, T. A., Becker, P. C. and Rhee, S. K., "Dry Friction and Wear of "Wheel-Rail Contact Mechanics at Full Scale on the Test Stand," Wear, Vol. 191, pp.101-106, 1996 Toughened Zirconias and Toughened Aluminas Against Steel," Wear, Vol. 110, pp.263-283, 1986
 8. Blomberg, A., Olsson, M. and Hogmark, S., "Wear mechanisms and Tribo Mapping of Al₂O₃ and SiC in Dry Sliding," Wear, Vol. 171, pp.77-89, 1994
 9. Kapelski, G., Platon, F. and Boch, P., "Unlubricated Wear and Friction Behaviour of Alumina and Silicon Carbide Ceramics," Proc. 15th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, pp.349-354, 1988
 10. Jang, Sun-Tae and Lee, Young Z., "Friction and Wear Behavior of Ceramics Under Various Sliding Environments," J. of the KSTLE, Vol. 11, No. 3, pp.11-23, 1995