

레일의 내마모성에 대한 타당성 연구

장세기^{a*}, 편영식^b

Feasibility Study for Wear Resistance of Rails

Seky Chang^{a*}, Young Sik Pyun^b^a Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 437-757, Korea^b Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University,
100 Galsan-ri, Tangjeong-myun, Asan, Cheongcheongnam-do, 336-708, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	June	2014
Revised	14	August	2014
Accepted	20	October	2014

Keywords:

Rail
Wear
Surface modification
Ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM)
Heat treatment

ABSTRACT

Rails are continuously exposed to severe environments due to increases in train service frequency, passing tonnage, and speed. Wear is one of the most common types of damage observed on rails. The surface of rails is heat treated to secure safety at critical sites, such as curved tracks or turnouts. Ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM), a new approach for rails, was examined to strengthen the rail surface. The effect of UNSM on the wear resistance of rail specimens was compared with that of heat treatment. Wear resistance was improved after UNSM treatment due to increased hardness and surface compressive residual stress.

1. 서론

철도교통은 운행 횟수의 증가와 함께 고속화 추세에 있고 따라서 레일의 안전점검 및 유지보수에 대한 필요성이 점차 커지고 있다. 철도차량의 바퀴가 레일의 헤드 부분과 지속적으로 접촉하면서 발생하는 진동과 미끄럼에 의해서 바퀴 및 레일의 접촉부분에 마찰 및 마모가 발생한다. 레일의 마모는 소재, 레일의 형상, 곡선부 반경, 선로구배, 열차속도, 선로의 보수상태 및 레일 도유상태 등에 의해 영향을 받는다^[1].

1990년대 이후 열차는 점차 속도가 높아지고 운행 빈도가 늘어나고 있다. 그런데 운행횟수 및 축중의 증가, 고속화 등은 철도레일의 마모를 가속화시키고 결과적으로 유지보수 및 레일 교체가 더욱 필요하게 만든다. 동시에 유지보수과정이 최적화되고 비용도 줄어

들어야 한다.

레일은 마모와 함께 피로손상에 더욱 빨리 그리고 쉽게 노출되고 있다. 이러한 현상은 철도 인프라의 생산성을 저하시킨다 즉, 레일의 마모는 속도저하를 가져오고 하중의 제한, 더욱 빈번한 유지보수점검 및 비용증가 등을 야기 시킨다.

높은 하중에 노출되는 철도 레일은 매 100 MGT마다 5백만 회 이상의 차륜-레일 접촉을 받는다. 이는 평균 20톤의 축중, 즉, 기관차 및 적재화물차 22.5톤, 여객용차 11~17톤을 기준하였다. 이러한 하중들이 모두 레일의 변형을 일으키지는 않는다 하더라도 대부분의 하중은 레일의 소성변형을 일으킨다. 매번 가해지는 레일의 변형은 표면층에 변화를 가져오고 이는 차륜과 레일이 최적의 상태로 접촉하지 못하도록 한다. 이러한 변화는 변형한계에 달할 때까지 지속되고 마침내 미세한 균열이 발생하게 된다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5381

Fax: +82-31-460-5021

E-mail address: seky@krii.re.kr (Seky Chang).

선로의 곡선부에서는 레일의 헤드 측면도 차륜과 접촉하여 마모 및 미끄럼 접촉 피로(rolling contact fatigue)가 발생하고 그 정도가 직선부보다 심하게 나타난다. 이러한 손상이 심해지면 레일을 교환하여 열차가 안전하게 운행할 수 있게 하여야 한다. 레일의 손상을 사전에 방지하기 위해서 주기적인 점검 및 유지보수를 실시하는데 이러한 과정들이 비용의 증가를 초래하게 되고 또한 이러한 레일의 손상주기를 늘리기 위해서 레일의 재료개선, 열처리, 표면처리 등 많은 연구들이 진행되어왔다¹⁻⁶⁾.

실제 선로에서 레일의 헤드부위 마모가 심한 구간에는 열처리된 레일을 사용하는데 열처리 과정을 거치면서 레일의 표면층이 강화되어 내마모성이 증가하게 된다. 탄소강 레일은 그 자체가 내마모성에 우수하지만, 내마모성을 더욱 향상시키기 위해, 레일의 헤드부에 담금질, 템퍼링(tempering)의 열처리를 한 것을 열처리 레일이라 한다. 열처리 레일에는 급곡선부에 사용하는 레일 헤드부 전체를 열처리한 헤드부 열처리 레일과 직선 구간에서 이음매 부위의 마모, 박리의 방지를 목적으로 하여 레일 끝에서 약 100 mm의 끝 헤드부 만을 열처리한 끝 헤드부 열처리 레일이 있다.

2. 초음파 나노표면개질

본 연구에서는 열처리 레일을 대체하는 새로운 방법, 즉 초음파 나노표면개질(Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM)을 이용하여 레일의 표면을 강화시키고 그에 따른 내마모성의 변화를 살펴보고자 하였다.

초음파나노표면개질 기술은 초음파 진동에너지를 응용하여 아주 큰 정적 및 동적 하중이 부가된 볼(ball)로써 접촉 응력 3~30 GPa로 1초에 20,000번 이상의 타격(1,000~100,000회/mm² 정도)을

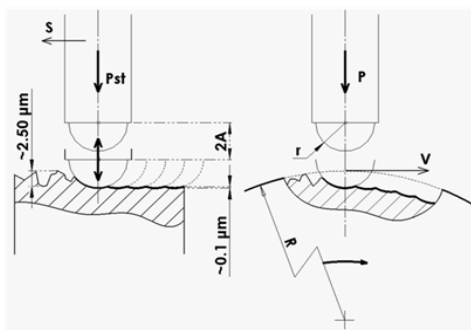


Fig. 1 Basic mechanism of UNSM

금속 표면에 주어, 많은 소성변형 및 탄성변형을 발생시키고, 이로 인해 표층부의 조직을 나노결정 조직으로 개질함과 동시에 아주 크고 깊은 압축잔류응력 등을 부가하는 기술이다. Fig. 1은 UNSM 기술의 기본 원리를 나타낸다. 초음파나노표면개질 장치의 구성은 진동자(20 kHz 또는 40 kHz), 부스터(booster), 혼(horn)으로 되어있고, 추가로 혼의 선단에는 볼(ball)과 볼을 고정시켜주는 볼팁(tip)이 위치해 있다.

초음파나노표면개질이 재료의 기계적 특성에 미치는 효과를 정리하면 다음과 같다⁷⁻⁹⁾.

- 면층에 압축잔류응력을 형성시켜서 구름접촉피로(Rolling Contact Fatigue) 및 응력부식균열에 대한 내구성을 향상시킨다.
- 표면에 직경 1~2 마이크로 크기의 미세한 덩이를 형성시킨다. 마찰계수를 감소시키고 마모율을 낮추는 효과가 있다.
- 표면경도를 증가시켜서 마모율을 낮추고 피로한도를 높이는 효과가 있다.
- 50~200 나노미터 크기의 입도를 갖는 나노결정 구조를 표면층에 형성시키며, 인장강도, 경도, 피로수명 및 마모율 등을 향상시키는 효과를 보인다.

3. 시편 및 표면물성

본 연구는 초음파나노표면개질 장치를 이용하여 레일의 표면을 강화시켜 표면물성변화 및 내마모 특성을 분석하고 열처리 레일과 비교를 함으로써 레일의 내구성을 향상시킬 목적으로 수행되었다.

레일은 철도운송에 사용될 목적으로 제작된 60킬로그램 급의 레일 일부를 샘플링 하였다. 레일시편은 열처리가 안 된 보통 레일과 열처리가 된 열처리 레일 두 종류이다. 각 레일의 헤드 부분을 와이어 컷(wire cut)으로 절단하였고 절단된 헤드 부분을 선반에서 원통형으로 가공 후 원반형 시편으로 절단 및 연삭을 통하여 분석용 시편을 제작하였다.

레일시편의 화학적 성분은 다음의 Table 1과 같다.

Fig. 2는 초음파나노표면개질 처리된 시편의 표면 형상을 보여 준다. 원반형으로 준비된 시편의 표면을 미세한 경질의 팁으로 표면개질 처리하였고 개질 처리된 부위는 사진에서 약간 어두운 형상으로 보여 진다. 이는 원반형 시편의 표면개질 이후에 발생한 표면조도 및 미세형상의 차이 때문에 나타나는 현상이다.

Table 2는 초음파나노표면개질 처리를 하기 전과 후의 표면물성

Table 1. Chemical composition of rail specimens

Items		C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Normal rail	60 kgK	0.68~0.80	0.15~0.58	0.70~1.20	≤0.025	≤0.025	-	-
Heat treated Rail	60 kgK	0.72~0.82	0.01~0.65	0.80~1.20	≤0.030	≤0.020	≤0.25	≤0.03

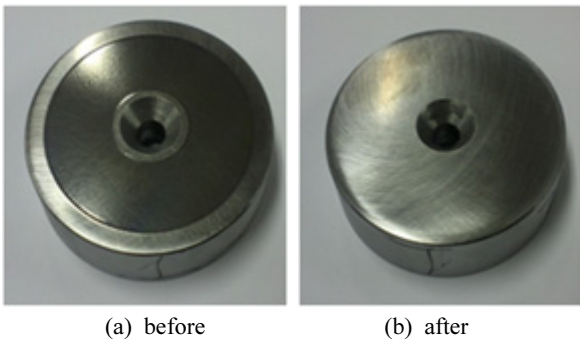


Fig. 2 Surface appearance before and after UNSM

Table 2. Physical properties of the rail specimens

Specimens		Surface hardness	Surface roughness	Compressive residual stress
Heat treated rail	before UNSM	HRC 37.0	0.136 μm	-167.8 MPa
	after UNSM	HRC 38.9	0.124 μm	-571.8 MPa
Normal rail	before UNSM	HRC 34.8	0.141 μm	-326.8 MPa
	after UNSM	HRC 37.1	0.131 μm	-607.8 MPa

변화를 측정된 결과이다. 열처리 레일 및 보통레일 모두에 대해서 동일한 실험을 하였다. 표면경도는 표면개질 처리 이후에 증가하는 경향을 보였는데 열처리레일은 5.1%, 보통레일은 6.6%의 증가를 나타냈다. 표면 거칠기는 열처리 레일 및 보통 레일 모두 8% 내외의 감소를 보였다. 압축잔류응력 역시 초음파나노표면개질 처리 이후 두 세배 정도의 증가를 보였다. 표층부의 압축잔류응력이 증가하면 강도 및 내마모성 등 기계적 특성의 증가를 가져올 수 있다.

레일의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 열처리를 하는데 보통 레일을 초음파나노표면개질 처리를 하였다니 열처리한 레일과 유사한 표면경도 값을 나타내었다.

4. 마모시험 및 고찰

레일시편에 대한 마모시험은 ASTM G99 시험기준에 맞춰서 실시하였다. 마모시험은 한 개의 세라믹 볼이 있는 ball-on-disc 방식으로 별도의 윤활제 없이 하였다. 마모시험 조건은 하중(접촉 응력), 회전속도 및 시험시간 등을 변경하면서 마모량을 비교하였다.

보통레일 및 열처리 레일 시편들을 초음파나노표면개질 처리하여 마모시험 전후의 무게변화를 측정하였다. 이런 일련의 시험을 통하여 초음파나노표면개질 효과를 레일의 열처리 효과와 비교할 수 있었다. 마모시험 값들은 Table 3에 보여 진다.

보통레일을 초음파나노표면개질 시킨 후에 마모시험 결과를 측정해보면 열처리레일의 마모시험 결과와 유사하거나 마모량이 더 적게 측정되기도 한다. 초음파나노표면개질 시험조건의 변화에 따라 열처리레일의 내마모성보다 더욱 우수한 보통레일의 표면 내구

Table 3. Wear amount of the rail specimens (unit: gram)

Wear test condition		Normal rail after UNSM	Heat treated rail before UNSM
60 min, 500 rpm, 2.0 GPa		0.0037	0.0037
60 min, 2.0 GPa	750 rpm	0.0045	0.0047
	1,000 rpm	0.0057	0.0062
60 min, 500 rpm	1.5 GPa	0.0029	0.0029
	2.5 GPa	0.0072	0.0069

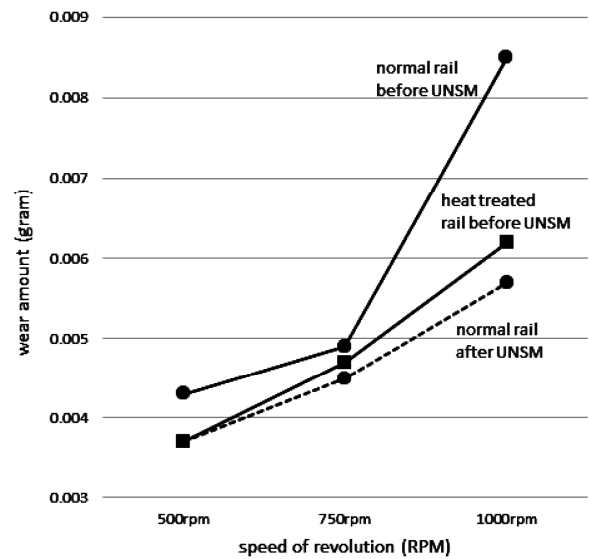


Fig. 3 Wear amount of the rail specimens with rpm of wear test

성을 확보 가능할 수도 있을 것으로 기대된다.

마모시험기의 회전속도를 높임에 따라 레일시편의 마모량은 증가하였다. 그러나 보통레일과 열처리레일을 비교하였을 때, 열처리레일의 마모량 증가가 초음파나노표면개질 처리된 보통레일의 마모량 증가보다 더욱 크게 나타났다. 그림 Fig. 3에서 보통레일의 마모량은 원으로 표시되고 열처리레일의 마모량은 네모로 표시하였다. 세로축은 마모량, 가로축은 마모시험기의 회전속도를 나타내는데 초음파나노표면개질 처리를 하기 전의 상태를 보여주는 실선 데이터에서는 모든 회전속도에서 열처리레일의 마모량이 보통레일보다 적게 나왔고 상대적으로 내마모성이 우수하였다. 그러나 Fig. 3에서 원으로 표시된 점선 데이터를 보면 초음파나노표면개질 처리된 보통레일은 모든 회전속도에서 열처리레일보다 마모량이 적게 나타나고 있다. 특히 회전속도가 증가할수록 열처리레일 마모량과의 차이는 증가하였다.

열처리레일을 초음파나노표면개질 처리하면 마모량은 현저히 줄어들지만 처리하기 이전에는 초음파나노표면개질 처리된 보통레일보다 마모특성이 떨어지는걸 알 수 있다. 마모시험기에 의한 내마모성의 비교가 실제 철도레일에서도 유사한 비교우위를 보일 수 있을지는 예측하기 어렵지만 초음파나노표면개질 처리의 효과가

마모특성을 향상시켰고 열처리레일의 마모량에 근접 또는 일부 우수한 특성을 보이고 있음을 실험실적 결과에서 확인할 수 있었다.

금속의 표면층에 초당 20,000번 이상의 미세한 타격을 가하면서 발생하는 조직의 미세화와 압축잔류응력의 변화가 표면층의 내구성을 향상시키고 결과적으로 외부의 충격에 대해서 금속원자의 결집력을 증가시키는 요인이 되는 것으로 초음파나노표면개질의 효과를 분석한다. 이러한 금속 표면층 조직의 압축잔류응력 변화는 표면 경도값을 높였고 내마모성을 향상시키게 되는 것이다.

초음파나노표면개질 처리 이후에 마찰계수의 변화가 나타났다. 보통레일은 0.011에서 0.009로 약 18% 감소하였고 열처리레일은 0.015에서 0.014로 약 7% 감소하였다. 마찰계수 진폭은 크게 줄어들었다. 보통레일은 0.0012에서 0.0003 약으로 약 70%, 열처리레일은 0.0012에서 0.0005로 약 58%가 초음파나노표면개질 이후에 감소하였다. 따라서, 채터링(chattering) 현상이 줄어들 것으로 예측된다.

5. 결론

표면물성 변화와 내마모성에 미치는 초음파나노표면개질 효과를 평가하기 위하여 보통레일과 열처리레일을 시험하였다.

레일시편의 표면에 초음파나노표면개질 처리를 하였고 표면경도와 표면압축잔류응력이 증가하는 것을 확인하였다.

열처리레일의 내마모성은 보통레일보다 우수하게 표면개질 이후 이들 레일의 내마모성은 모두 향상되었다.

초음파나노표면개질 처리된 보통레일의 내마모성은 그렇지 않은 열처리레일의 내마모성과 동일하거나 우수하게 나타났는데 마모시험기의 회전속도가 증가할수록 이러한 경향이 더욱 뚜렷하였다.

열차운행 횟수가 증가하고 고속화가 되어가는 철도교통 환경에서 안전을 확보하고 유지보수 비용을 절감하기 위해서 레일의 초음파나노표면개질 기술이 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Vidaud, M., Zwanenburg, W. J., 2009, Current Situation on Rolling Contact Fatigue - A Rail Wear Phenomena, 9th Swiss Transport Research Conference, 1-27.
- [2] Smith, R. A., June 2001, Railway Technology - The Last 50 Years and Future Prospects, Japan Railway & Transport Review, 27 16-24.
- [3] Olofsson, U., Lewis, R., 2006, Tribology of the Wheel - Rail Contact, Handbook of Railway Vehicle Dynamics, 125-133.
- [4] Povilaitiene, I., 2006, Influence of Gauge Width on Rail Side Wear on Track Curves, Journal of Civil Engineering and Management 12:3 255-260.
- [5] Ryu, S. H., Kim, S. S., Kim, D. S., Kim, S. Y., Hong, J. H., 2014, Verification of Running Safety Evaluation Method for High-speed Railway, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 23:3 310-317.
- [6] Cho, J. U., Han, M. S., 2012, Structural Analysis on the Wheel of Railway Vehicle, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 21:3 451-458.
- [7] Cho, I. S., Lee, C. S., Amanov, A., Pyoun, Y. S., Park, I. G., 2011, The Effect of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification on the High-Frequency Fretting Wear Behavior of AISI304 Steel, Journal of Nanoscience and Nanotechnology 11:1 742-746.
- [8] Suh, C. M., Song, G. H., Park, J. H., Pyoun, Y. S., 2006, A Study of the Mechanical Characteristics of Ultrasonic Cold Forged SKD61, International Journal of Modern Physics B 20:25-27 4541-4546.
- [9] Cho, I. H., Song, G. H., Kim, C. S., Nobuhide, A., Suh, C. M., Park, J. H., Combs, A., Park, J., Pyoun, Y. S., 2005, Nano Structured Surface Modification of Tool Steel and its Beneficial Effects in Mechanical Properties, Journal of Mechanical Science and Technology 19:11 2151-2156.