

경두레일 용접부의 경도와 마멸특성에 관한 실험적 연구

황준태 · 김청균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Experimental Study on the Hardness and Wear Characteristics of Welded Head Hardened Rails

Jun Tae Hwang · Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract - In this paper, the hardness and wear characteristics of the head hardened rail, which is made by thermite and gas pressure weldings have been presented. In general, the wear rate of the gas pressure welded rail is high and uniform compared with that of thermite welded rail. The results indicate that HH 370 welded rail shows stable in hardness and low wear rate compared with other two welded rails. The hardness of head hardened rails shows uniformly distributed along the welded zone, thermally affected zone and a base matrix.

Key words : head hardened rail, hardness, welded rail, wear, thermite welding, gas pressure welding

1. 서론

철도차량은 안전성과 대량수송의 장점을 갖고 있으면서도 자동차의 임의 이동성 때문에 잠시 퇴조하는 경향을 보이기도 하였으나, 최근 에너지 가격의 급등과 고속화 기술을 접목한 대량수송의 장점이 부각되면서 철도수송에 대한 관심이 다시 높아지고 있다.

거대한 철도차량을 가장 효과적으로 이동시키는 방법으로 도입된 레일(rail)과 휠(wheel)의 접촉운동 메카니즘은 마찰운동에 대한 저항손실을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 레일과 휠의 접촉방식은 운동에 대한 마찰저항을 대단히 낮출 수는 있으나, 레일의 두부(rail head)와 휠의 플랜지에서 발생하는 마멸(wear)이나, 레일과 레일을 연결한 용접 지역에서의 피로파손은 내구성과 안전성 측면에서 항상 문제점으로 지적되

어 왔다.

최근에 철도차량의 고속화와 고하중화가 적극 추진되고 있으며, 그 결과로 레일과 휠 사이의 마멸에 의한 수명단축과 레일 용접부에 대한 안전성이 크게 부각되었다. 레일에 대한 이러한 문제점을 완화시키기 위한 방안으로 개발된 경두레일(head hardened rail)은 레일의 두부를 열처리하여 경도를 일정한 수준으로 균일하게 높혀줌으로써 내마멸성을 증가시키고, 반복하중에 의한 피로파손을 완화시키고자 한다.

산악지대, 구릉, 강변 등이 많은 우리나라에서는 비교적 레일의 곡선부가 많으므로 레일과 휠의 마찰 접촉면에서 마멸이 많이 발생된다. 레일 용접부에서는 열영향부와 모재부 사이의 계면에서 특히 경도차이로 인한 마멸이 급격하게 진행되어 궁극적으로는 레일이 피로파단으로 진전되는 문제점을 갖고

있다[1].

레일의 두부(rail head)에서는 휠로부터 전달되는 반복적인 충격하중을 작은 접촉면적에서 모두 받아야 하므로 주름(ripple, surface corrugation) 형태의 마멸이 발생되고[2], 최악의 경우는 레일의 용접부에서 파단이 진행되어 차량이 탈선하는 사고가 발생되기도 한다.

본 연구에서는 경두레일 용접부의 두부에서 발생하는 마멸특성과 경도분포를 기존의 탄소강 레일(steel rail)과 비교하여 실험적으로 고찰하고자 한다. 이 때에 레일과 레일의 용접은 테르밋 용접과 가스압접의 두가지로 실시하였고, 레일의 모재부, 열영향부, 용접부에 대한 경도와 마멸특성 평가를 수행하였다.

2. 경두레일

경두레일(HH rail)은 두부에서 발생하는 마멸을 줄이기 위하여 레일표면을 열처리한 것으로 레일의 곡선 경사부에 사용하는 것이 유리하다. 레일에 열을 가하는 방식에 따라서 HH 레일과 NHH 레일의 두가지가 있다. HH 레일은 두부에 고주파 유도가열, 가스화염 가열, 냉각수 퀘칭 열처리를 실시한 것이고, NHH 레일은 레일을 압연가공한 직후에 레일이 보유하고 있는 열을 이용하여 공냉에 따른 슬래그 퀘칭처리를 실시한 것으로 가장 널리 사용되고 있다.

Table 1과 Table 2는 탄소강 레일, HH 340 경두레일, HH 370 경두레일의 모재부에 대한 화학성분과 기계적 성질을 제시하고 있다[3]. 탄소강에 열처리를 실시한 레일은 보통의 레일에 비하여 탄소 함유량이 증가하고, Cr이나 V과 같은 합금 성분을 함유하고 있다. 여기서 HH 340과 370은 레일 두부의 열처리 경화정도를 브리넬 경도로 나타내 것으로 종래의 경두레일에 비하여 열처리 경화층 깊이가 크고, 열처리 경화층은 미세 펄라이트 조직을 하고 있으므로 내마멸성이 우수하다.

Table 1. Chemical composition of the rail

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Carbon Steel	0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	<0.03	<0.025	-	-
HH 340	0.72~0.82	0.10~0.55	0.70~1.10	<0.03	<0.02	<0.20	<0.03
HH 370	0.72~0.82	0.10~0.65	0.80~1.20	<0.03	<0.02	<0.25	<0.03

Table 2. Mechanical properties of the rail

	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HB)
Carbon Steel	>82	>10	>235
HH 340	>110	>8	>340
HH 370	>115	>8	>370

3. 실험

3-1. 실험장치

마멸특성을 고찰하기 위한 마멸 시험기에서의 마찰 접촉모드는 Fig. 1에서 제시한 것처럼 핀-디스크 접촉을 하면서 건조마찰 미끄럼 운동을 하고 있다. 마멸실험을 위하여 시험편에 가해진 수직하중은 상부로부터 스크류 방식으로 스프링 하중을 가하고, 이 힘은 다시 시험편에 균일하게 가해진다. 로드셀은 시험편에 가해진 수직하중과 토크 마찰력을 측정하도록 두 개가 설치되어 있고, 축방향의 진동도는 0.02mm 이하가 되도록 하여 실험장치의 강성도를 확보하였다. 또한 실험 장비의 특성상 마찰력 변화에 따른 속도의 감소 변화를 방지하여 마찰, 마멸특성 평가에 대한 신뢰도를 확보할 수 있도록 서보 모터를 사용하였다.

3-2. 시험편

마멸 시험기에서 사용한 표준시험편은 5mm 두께를 갖는 29.5mm의 디스크 형상으로 제작된 것으로 Fig. 2와 같고, 핀은 10.2 mm 직경의 강구(steel ball)이다. 레일의 마멸 시험편은 레일 두부(rail head)의 바로 아래 용접부를 중심으로 Fig. 3과 같이 샘플링 하였다.

또한 시편은 레일의 용접부를 중심으로 좌우에서 채취하였기 때문에 레일 마멸율의 변화 추이를 정확히 확인할 수 있도록 부식하여 경계면을 관찰하고 시편을 가공하였다.

3-3. 실험조건 및 측정

(1) 실험조건

레일과 휠의 마찰 접촉면은 주변의 물이나 습증기, 모래입자 등에 의하여 오염될 우려가 있지만, 미끄럼 또는 구름 마찰의 대부분은 건조마찰(dry friction) 상태에서 일어나기 때문에 본 연구에서는 레일과 휠 사이에 이물질이 개입되지 않은 건조마찰에 의한 마멸 특성 해석에 초점을 맞추었다.

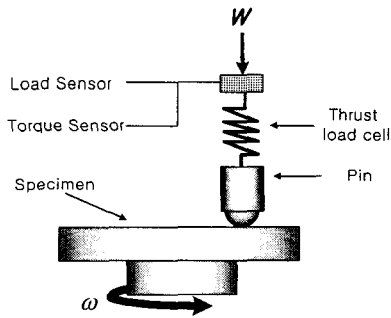


Fig. 1 Schematic of friction and wear tester apparatus

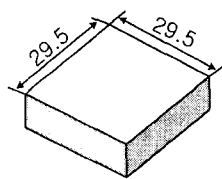


Fig. 2 Rail specimen

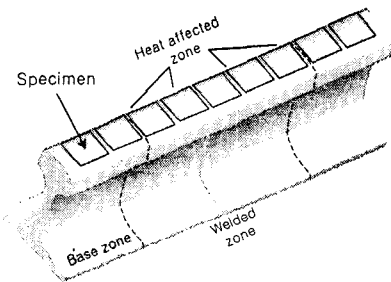


Fig. 3 Sampling of the welded rail specimens

시편에 가한 하중은 1.5, 3, 4.5kg으로, 가공된 시편에는 항상 동일한 접촉조건이 되도록 하였고, 각각의 실험조건에 대하여 5분간씩 실험을 지속하였다. 여기서 실험시간은 3~5분 정도면 마찰계수의 안정화에 도달하기에 충분한 시간이다[4,5]. 그리고 각각의 시편에 대한 실험은 3~4회 반복 실험을 수행하여 평균한 결과를 제시한 것으로 신뢰도가 높다.

핀과 디스크 사이의 미끄럼 마찰 속도를 0.2m/s로 고정하였는데, 이것은 속도의 변화가 마멸량이나 마멸율에 그다지 영향을 주지 않는다는 사실이다[6,7]. 또한, 본 마멸실험에서 실험속도를 0.2m/s 이상으로 증가시키게 되면 빠른 회전속도에 의하여 마찰면에서는 이상진동이 발생하므로 진동에 의한 마멸이 급속하게 증가하기 때문에 이러한 마찰접촉은 피하였다.

(2) 측정

경도는 레일의 마멸특성에 직접적인 영향을 주기 때문에 레일의 경도는 모든 시험편에 대해 3차원 비커스 경도계로 측정하였고, 마찰재의 가공 정밀도에 의한 접촉조건이 항상 균일하도록 설정하였다.

또한 마멸실험을 수행하기 전에 가공된 시편은 초정밀 저울로 무게를 측정하고, 실험을 완료한 이후에 다시 동일한 방법으로 무게를 측정하여 마멸량의 발생 정도를 고찰하였다. 각각의 시편에 대한 마멸 길이당의 마멸율(wear rate)은 시편에 가한 하중으로 표시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 경도분포 해석

(1) 용접부의 경도분포 해석

Fig. 4는 실험에 사용된 기존의 탄소강 레일과 경두 레일(HH 340과 HH 370)에 대한 경도분포를 제시한 결과로 테르밋 용접법으로 접합된 레일 시편은 모재부, 용접부, 열영향부에 따라서 비교적 분명한 경도 분포도

차이를 보여주고 있다. 그러나 가스 압접방식으로 제작된 경두 레일은 테르밋 용접에 비하여 전구간에 걸쳐서 경도분포가 비교적 균일함을 알 수 있다. 이러한 경두레일이 기존의 비열처리 레일에 비하여 경도 분포도가 크게 안정화된 결과로 경두레일에서는 마찰 표면의 균질성을 크게 강화시켰기 때문이다.

테르밋 용접으로 제작된 경두레일은 용접부와 열영향부에서의 상대적인 경도차가 좁은 범위에 걸쳐서 크게 나타나지만, 가스압접 경두레일에서는 테르밋 경우에 비하여 용접 열영향부의 폭이 넓으면서도 비교적 균일하게 분포되므로 용접부의 기계적 성질이 양호하게 된다.

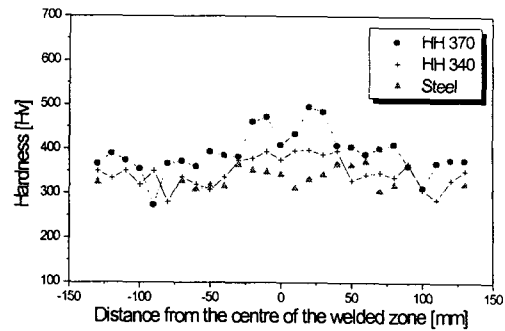
(2) 레일 깊이에 따른 경도분포

Fig. 5는 테르밋 용접레일의 용접부에서 열처리 효과를 측정된 경도분포 결과로 레일의 두부(rail head)로부터 소재 내부로 들어갈수록 경도값이 떨어지는 경향을 보여주고 있다. 여기서 HH 370이나 HH 340과 같은 경두레일은 경도 분포도가 비교적 균일하게 나타났지만, 기존의 탄소강 용접레일은 두부에서 HH 370의 경도값을 유지하다가 두부로부터 멀어질수록 HH 340 이하의 수준으로 크게 떨어지는 경향을 보여준다.

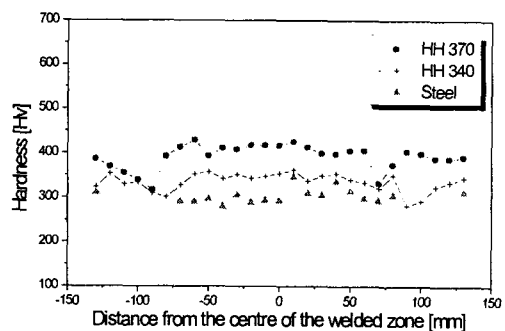
그러나 실험결과에서 제시한 것처럼 용접 두부로부터 깊이 20mm 이상에서는 레일의 표면 열처리 영향에서 떨어진 모재부에 도달하기 때문에 항상 일정한 경도값을 유지하지만, 경두레일은 아직도 높은 경도를 균일하게 유지하는 특징을 보여주고 있다.

4-2. 마멸을 해석

Figs. 6과 7은 건조마찰 상태에서 사용하는 기존의 탄소강 레일과 경두레일에 대한 마멸율을 접촉하중과 경도 분포도에 대하여 각각 측정된 실험결과이다. 용접레일에서 접촉하중의 증가는 마멸율을 크게 증가시키고, 경도의 증가는 마멸율을 감소시키는 경향으로 나타내고 있다. 또한 용접레일에서의 마



(a) Thermite welded rail



(b) Gas pressure welded rail

Fig. 4 Hardness distribution at the welded zone

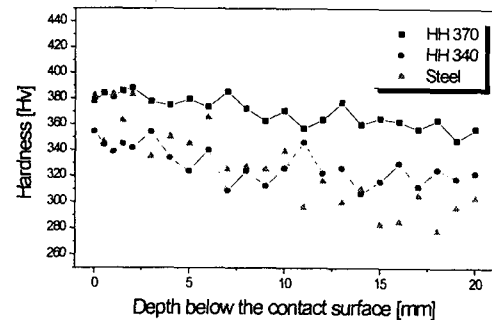


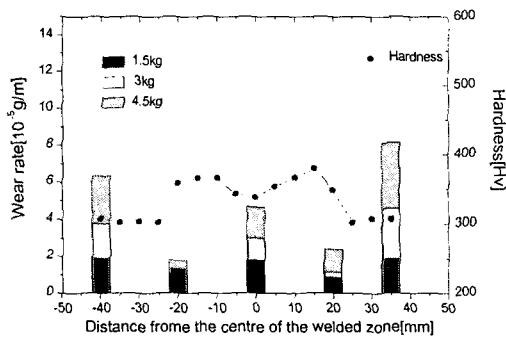
Fig. 5 Hardness profile below the surface of the rail

멸율이나 경도는 레일의 용접부를 중심으로 대칭적으로 나타나는 특징을 갖고 있다.

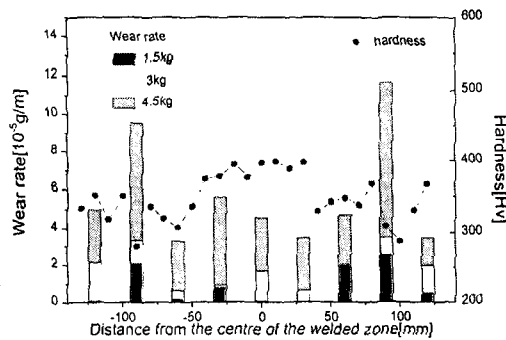
테르밋 용접으로 제작된 기존의 탄소강 레일에 대한 Fig. 6(a)의 실험결과에 의하면 열영향부에서 가장 높은 경도를 보여주고, 이 지역에서 낮은 마멸율이 발생되고 있다. Figs. 6(b)와 6(c)의 경두레일 용접부에서 측

정된 경도는 전반적으로 높지만, 특히 접촉 하중이 클수록 마멸율은 기존의 탄소강 레일에 비하여 높은 증가를 보여주고 있다. 탄소강 용접레일과는 달리 열영향부와 모재부가 만나는 지역에서의 마멸은 접촉하중이 증가할수록 높게 나타났는데, 이것은 경두레일의 경우 용접에 의한 열영향이 레일의 경도변화에 큰 영향을 주지 못하고 있다는 사실이다.

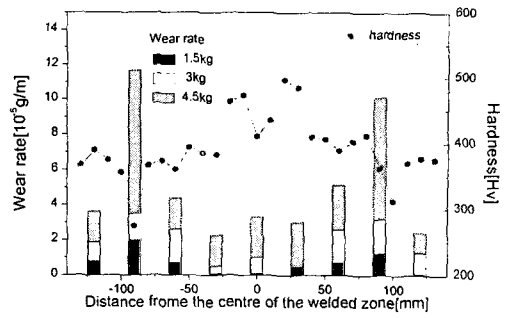
Fig. 7은 가스 압접으로 제작된 레일에 대한 실험결과로 경도는 테르밋 용접 레일에 비하여 균일하고, 열영향부와 용접부의 경계가 불분명하다는 특징을 갖고 있다. 가스압접 레일에서의 마멸율은 테르밋 용접 레일에 비하여 마멸율이 높고, 균일하게 분포되는 특성을 나타내고 있다. 가스 압접으로 제작된 경두레일에서 열영향부와 모재가 만나는 부위의 마멸을 차이가 기존의 탄소강 가스압접 레일에 비하여 크게 나타난 것이 다르게 관찰되었고, 이러한 현상은 HH 340의 가스접합 레일보다는 HH 370에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.



(a) Carbon steel rail

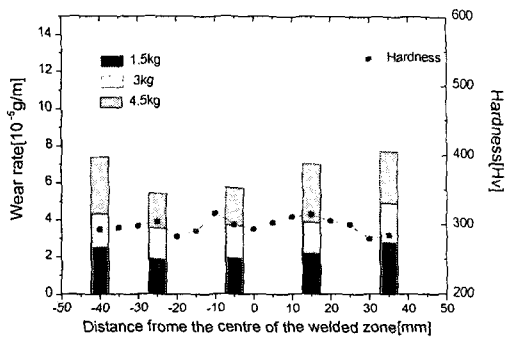


(b) HH 340

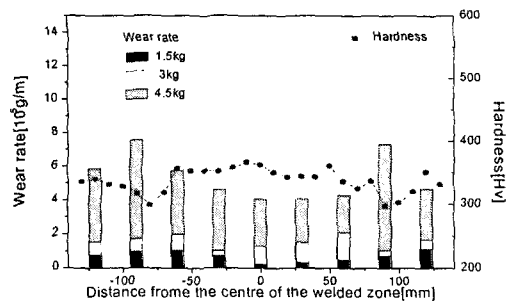


(c) HH 370

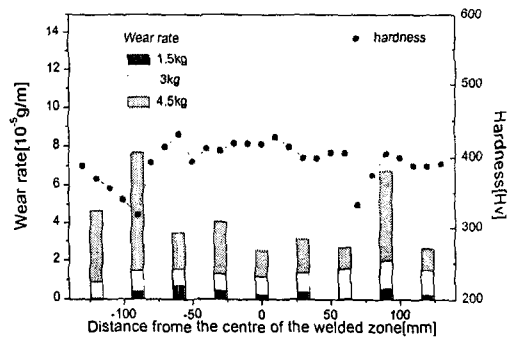
Fig. 6 Wear rate and hardness distribution of the thermite welded rail for various contact loadings



(a) Carbon steel rail



(b) HH 340



(c) HH 370

Fig. 7 Wear rate and hardness distribution of the gas pressure welded rail for various contact loadings

이들의 실험결과에 따르면 테르밋 용접 레일에서는 경도차와 마멸율의 변화가 크기 때문에 용접 레일부의 반복피로에 의한 마멸이나 크랙이 발생될 우려가 상대적으로 높다. 그러나 가스압접 레일에서의 마멸율이 비록 높기는 하지만 균일하게 발생하며, 경도분포가 상대적으로 균일하다는 사실이 피로강도와 마멸특성 측면에서 대단히 유리한 결과를 제시한다.

5. 결 론

테르밋 용접과 가스압접으로 제작된 기존의 탄소강 레일과 경두 레일에 대한 경도와 마멸특성 관계를 실험적으로 고찰하였다.

테르밋 용접으로 제작된 기존의 탄소강 레일에서는 특히 용접 경계선을 따라서 마멸율이나 경도측면에서 불안정하나 가스압접으로 제작된 레일은 대단히 안정적이다. 또한 경두레일에서는 레일의 용접방법에 관계없이 안정적인 마멸특성을 보여주고, 특히 가스압접으로 제작된 HH 370 경두레일에서는 가장 우수한 내마멸 특성을 보여주고 있다.

참고문헌

[1] 김청균, 황준태, 나성훈, 민경주, "레일 용접부의 경도와 마멸특성에 관한 실험적 연구," 한국윤활학회 추계학술대회, pp.234-243, 1998.

[2] Baumann, G., Fecht, H. J., and Liebelt, S., "Formation of White-Etching Layers on Rail Treads," *Wear*, Vol. 191, pp.133-140, 1996.

[3] 須田征男, 長門 彰, 徳岡研三, 三浦 重, "新しい線路 -軌道の構造と管理-, " 日本軌道施設協會, pp.58-63, 平成 9年.

[4] 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.

[5] Jang, Sun-Tae and Lee, Young Z., "Friction and Wear Behavior of Ceramics under Various Sliding Environments," *J. of the KSTLE*, Vol. 10, No. 1, pp.11-13, 1997.

[6] Bsck, T. A., Becker, P. C. and Rhee, S. K., "Dry Friction and Wear of Toughened Zirconias and Toughened Aluminas Against Steel," *Wear*, Vol. 110, pp.263-283, 1986.

[7] 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.