

레일 용접부의 경도와 마멸특성에 관한 실험적 연구

김청균 · 황준태 · 나성훈* · 민경주*

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

*한국철도기술연구원

Experimental Study on Hardness and Wear Characteristics of Welded Rails

Chung Kyun Kim, Jun Tae Hwang, Sung-Hoon Na*, Kyung-Joo Min*

Tribology Research Center, Hongik University

*Korea Railroad Research Institute

Abstract - In this paper, thermite and gas pressure weldings have been used to join rails in-track and analyzed as functions of hardness and wear characteristics. The wear rate of thermite welded rail is low compared with that of gas pressure welded rail, which is tested in a pin-on-disk wear tester. The hardness of thermite welded materials is relatively high and narrow distributed between three zones, welded part, thermally affected zone, and a base matrix. Wear of a welded rail may be a major factor in railroad maintenance costs and failures at the rail-rail butt joint.

Key words : rail, wheel, thermite welding, gas welding, hardness, wear

1. 서 론

철도차량에 설치된 휠(Wheel)과 지상면에 고정된 레일(Rail)이 서로 굴름마찰이나 미끄럼 마찰운동을 하면서 철도차량은 이동하게 된다. 레일은 철도차량으로부터 하중을 받아 지면으로 전달하고, 동시에 철도차량의 휠과 적절한 마찰력을 유지하면서 안전한 운행을 할 수 있도록 안내 역할을 수행한다.

레일은 가능하면 장축으로 제조하는 것이 바람직하지만 무한정 길이로 제작할 수 있는 것은 아니고, 일반적으로 레일의 운반성을 고려하여 25~50m 정도로 제조된다. 레일이 실제로 설치되는 곳은 평지의 직선부, 산악이나 강변지대의 곡선부와 경사부 등 설치 환경이 다양하다. 이러한 설치환경과 레일의

압출기술을 고려하면 레일의 실제 제조길이는 짧게하는 것이 바람직하나, 레일과 레일을 반영구적으로 연결하는 볼트와 너트에 의한 체결방식과 레일과 레일을 영구적으로 접합하는 용접방식에 따라서 달라진다.

레일과 레일을 기계적으로 체결하면 레일을 간단하게 효율적으로 연결할 수 있고, 유지보수 측면에서 유리하나 레일의 수명이나 차량의 안전 운전측면에서는 불리하다. 반면에 용접으로 레일과 레일을 연결하면 작업성과 경제성 측면에서 불리하나 차량의 안전성, 수명, 내구성 등에서 대단히 우수하다는 특징을 갖는다. 최근의 철도차량이 고속화와 고하중화를 추구하는 경향에서 레일을 연결하는 방식은 연결부의 수명과 유지·보수 측

면에서 단연 용접에 의한 영구 결합법을 채택하고 있다[1]. 테르밋 용접은 레일의 용접에서 널리 사용되어 왔고, 사용장비나 소비재 측면에서 보면 용접당 50\$로 가장 저렴하다.

본 연구에서는 레일과 레일을 연결하는 용접방식에 따른 용접부근에서의 경도분포와 이에 따른 마멸특성을 실험적으로 고찰하고자 한다. 레일과 레일을 접합시키기 위하여 널리 사용하는 테르밋 용접(Thermite welding)과 가스 압접(Gas pressure welding)의 두가지 용접방식에 대한 마멸특성과 경도의 상호연계를 고찰하여 레일 용접부에 의한 문제점을 규명함으로써 레일의 수명 연장과 유지보수 효율 향상에 기여하고자 하였다.

2. 마멸 해석

상대 접촉 운동면에서 발생하는 마멸은 반복하중에 의한 피로, 마찰열에 의한 국부적인 용융과 열탄성 마멸, 부식성 물질의 침입, 윤활유의 증발현상 등에 의하여 마찰 접촉면이 과도한 응력을 받게 되면 소재의 일부가 떨어져 나가는 현상을 마멸(Wear)이라 한다.

마찰재에서 경도가 마멸율에 미치는 영향은 큰 것으로 알려져 있는데, 건조마찰의 경우에 제시된 마멸율은 Archard의 마멸 방정식에 의하여 간단하게 제시된다[2]. 즉, 미끄럼 마찰 거리당의 마멸량 I 는 상대 접촉면에 가해지는 법선력 W 에 비례하고, 접촉면에서 연한 소재의 경도에 반비례하는 것으로 알려졌다.

$$I = K \frac{W}{H} \quad (1)$$

여기서 K 는 마멸계수로 마찰면의 접촉조건

에 따라서 결정되는 상수로 항상 1보다 작다. 마멸계수 K 는 마찰면에서 소재의 마멸특성을 제시해주는 파라미터로 서로 다른 소재의 마멸특성을 표현하는데 대단히 편리한 계수이다. 소재의 마멸계수 K 가 크면 마멸이 잘 진행되어 피로 파손으로 연결될 우려가 높고, 마멸계수가 작으면 마멸 진행속도가 느리다는 것을 의미한다.

레일의 두부와 플랜지에 대한 열처리를 할 경우 경도증가에 따른 마멸율은 낮게 된다. 따라서 마멸은 상대 접촉운동을 하는 물체의 특성, 기하학적 형상, 마찰환경, 하중, 속도 등에 따라서 크게 달라진다. 기본적으로 모든 마멸은 두개의 마찰표면 사이의 상호작용에 의하여 발생하고, 부식마멸을 제외한 모든 마멸은 상대 접촉속도와 하중이 가해져야 마찰 표면층을 탄소성적으로 변형시키고, 반복하중에 의한 피로를 소재가 경험하여 마멸을 일으키게 된다. 모든 메탈은 용융된 소재가 냉각하면서 냉각속도와 냉각 분위기의 차이로 인한 결정입자가 경계면에 의하여 분리되고, 이들 경계면에는 기공(Cavity)이나 불순물과 같은 각종 이물질, 편석 등이 발생하게 된다. 이러한 소재 내부의 문제점과 열처리나 표면처리, 기계가공 정도, 가해진 작동조건 및 작업환경 등은 마멸 발생에 중요한 역할을 담당하게 된다.

마멸과정(Wear process)에서 재료의 손상을 야기시키는 마멸 메카니즘은 어느 특정의 메카니즘이 독립적으로 작용하는 것이 아니고, 항상 여러 현상들이 복합적으로 동시에 작용하면서 마멸의 문제점을 발생시킨다.

본 연구에서 제시된 마멸율은 각각의 접촉 조건에 대하여 시험편으로부터 떨어져나간

마멸량(g)을 총 마멸길이로 나눈값을 의미한다.

$$K_s = \frac{L_w}{S} \quad (2)$$

여기서 L_w 는 정밀저울에서 측정된 마멸량 무게(g)이고, S 는 미끄럼 마찰거리를 각각 나타낸다.

3. 실험

3-1. 실험장치

실험에 사용된 마멸 시험기(ORIENTEC Model : EFM-III-F)는 Fig. 1과 같고, 마찰 접촉모드는 Fig. 2에서 제시한 것처럼 핀-디스크 접촉 이외에 원통형 링-원통형 링 접촉, 원통형 링-플레이트의 세가지 접촉모드가 마멸시험에 사용될 수 있다.

실험장치의 아래쪽 회전축에는 Fig. 2와 같은 레일 시험편을 Fig. 1의 A 구역에 설치하여 마멸실험을 실시한다. 실험장치의 상부에는 스크류 방식으로 하중을 스프링에 가하고, 이 힘은 다시 시험편에 수직으로 균일하게 가해진다. 로드셀은 시험편에 가해진 수직하중과 마찰력을 측정하도록 두 개가 설치되었다. 그리고 축방향의 진동도는 0.02mm 이하가 되도록 하여 실험장치의 강성도를 확보하였다. 또한 실험 장비의 특성상 특히 마찰력 변화에 따른 속도의 감소 변화를 방지하여 마찰, 마멸특성 평가에 대한 신뢰도를 확보할 수 있도록 하기 위하여 서보 모터를 사용하였다.

3-2. 시험편

핀-디스크 마찰 모드와 마멸 시험기에 사용한 표준시험편은 5mm 두께를 갖는 29.5mm

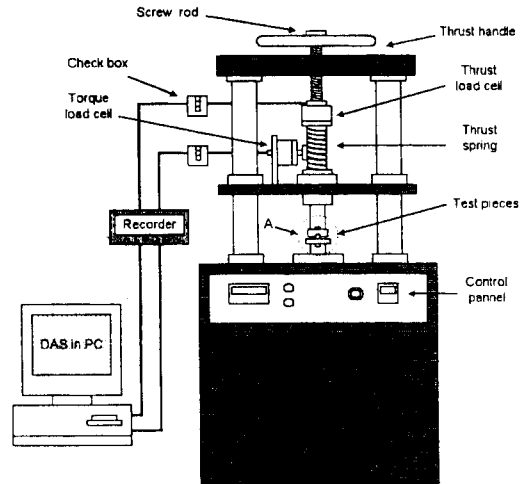
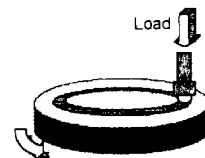
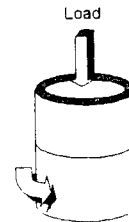


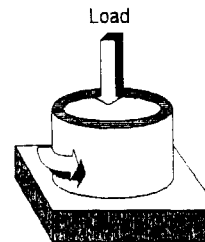
Fig. 1 Friction and wear testing apparatus.



(a) Pin-on-disk



(b) Cylinder-on-cylinder



(c) Cylinder-on-plate

Fig. 2 Contact models for a friction and wear tester.

의 정사각형으로 Fig. 3과 같고, 편은 10.2 mm 직경의 강구이다. 레일의 마멸 시험편은 레일 두부 바로 아래의 용접부를 중심으로 Fig. 4와 같이 채취하였다. 시험편은 레일의 용접부를 중심으로 좌우로부터 채취한 것으로 마멸율의 변화추이를 정확히 확인할 수 있도록 부식하여 시험편을 준비하였다.

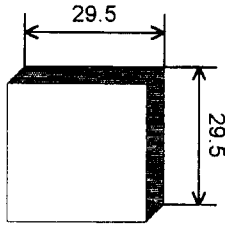
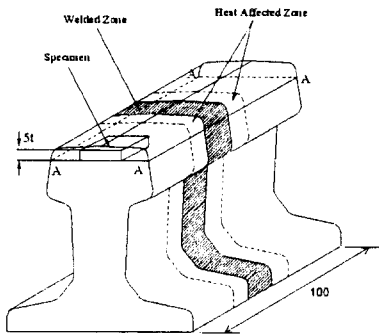
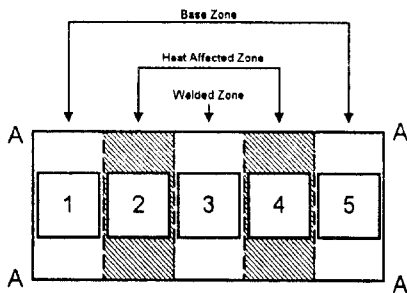


Fig. 3 Standard dimension of the rail specimen for a wear test.



(a) Rail



(b) Sampling

Fig. 4 Sampling of the rail specimens.

실험에 사용된 시험편의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 2에서 각각 제시하고 있다.

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

3-3. 실험방법 및 조건

(1) 실험방법 및 실험조건

레일과 휠은 주변의 환경적 요인에 따라서 물이나 습증기, 모래입자 등에 의하여 오염될 우려는 있지만, 레일과 휠에서의 미끄럼 또는 구름 마찰의 대부분은 건조마찰(Dry friction) 상태에서 일어나기 때문에 본 연구에서는 레일과 휠 사이에 이물질이 개입되지 않은 건조마찰에 초점을 맞추었다.

시험편에 가한 하중은 1.5, 3, 4.5kg로 가공된 시험편에는 항상 동일한 접촉조건이 되도록 하였고, 각각의 실험조건에 대하여 5분간씩 실험을 지속하였다. 여기서 실험시간은 3~5분 정도면 마찰계수의 안정화에 도달

하기에 충분한 시간이다[3,4]. 각각의 시험편에 대한 실험치는 2~3회 반복 실험한 결과를 평균한 것으로 반복성이 높다.

본 연구에서는 미끄럼 마찰 속도를 0.2m/s로 고정하였는데, 이것은 속도의 변화가 마찰량이나 마멸율에 그다지 영향을 주지 않는다는 사실이다.[5,6] 또한, 본 마멸실험에서 실험속도를 0.2m/s 이상으로 증가시키게 되면 빠른 회전속도에 의하여 마찰면에서는 이상진동이 발생하므로 진동에 의한 마멸이 급속하게 증가하는 건조마찰의 특성이 나타난다.

시험편에 가하는 수직하중과 마찰력은 로드셀과 오실로그래프에 연결된 데이터 획득장치(Data Acquisition System)에 의하여 컴퓨터에 저장하였고, 데이터 분석은 해석용 프로그램인 DT-VEE를 사용하였다.

(2) 측정

(가) 경도측정

경도와 마멸과의 관계는 Archard의 마멸 방정식에서 언급하였듯이 마멸특성에 직접적인 영향을 주기 때문에 레일의 경도는 모든 시험편에 대하여 3차원으로 측정하였고, 본 연구에서 사용한 디지털 마이크로 비커스 경도기는 Matsuzawa 모델 MAT- $\alpha 7e$ 이다.

(나) 마멸량 측정

마멸실험을 수행하기 전에 가공된 시험편은 정밀 저울로 무게를 측정하고, 실험을 완료한 이후에 다시 동일한 방법으로 무게를 측정하여 마멸량 발생 정도를 고찰하였다. 각각의 시험편에 대한 마멸 길이당의 마멸율(Wear rate)은 시험편에 가한 하중으로 표시

하였다.

마멸량을 측정하기 위하여 사용한 초정밀 저울은 0.001g의 오차범위를 갖는 Denver Instrument사의 AA-250 모델이다.

4. 실험결과 및 고찰

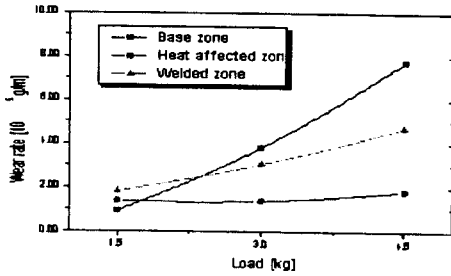
4-1. 하중과 마멸율

Fig. 5는 레일과 휠이 건조마찰 상태에서 가해진 접촉하중 변화에 따른 마멸율의 측정 결과로 레일에 대한 하중이 증가할수록 마멸은 비선형적으로 가속된다는 사실을 보여주고 있다. 이 결과는 Archard의 마멸식에서 하중은 마멸율과 비례한다는 사실과는 다른 것이나, Clayton[7]이 수행한 Cr-Mo 레일소재에 대한 연구결과와 같은 경향을 나타낸다. 즉, 마찰 운동면에서의 마멸율은 하중에 따라서 다르게 표현되어야 하고, 고하중으로 갈수록 Archard 마멸 방정식은 더 이상 맞지 않는다는 사실이다. 또한 테르밋 용접재에서는 용접부위에 따라서 마멸율이 크게 다르지만, 가스 용접재의 경우는 용접부에서의 마멸율이 비교적 균일하고, 테르밋 용접재에 비하여 마멸율이 높게 나타났다.

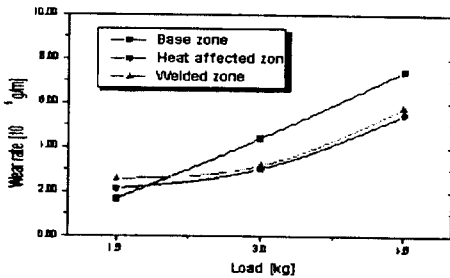
그렇지만 레일에 작용하는 하중이 작고, 경도가 낮은 레일 소재에서는 Archard의 마멸 방정식처럼 선형적 비례관계가 성립된다[7]. 레일의 경도가 300HB 이상이고, 가한 하중의 크기가 클수록 마멸율 I_{wear} 은 하중의 1/2~2/3으로 가속된다는 사실이 여러 연구에서 제시되고 있으며[7,8], 본 연구에서도 접촉하중이 증가할수록 이러한 비선형 가속 마멸형태의 결과가 관찰되었다. 즉,

$$I_{wear} \propto W^{1/2} \sim W^{3/2} \quad (3)$$

여기서 W 는 레일에 가해진 법선하중이다.



(a) Thermite welding



(b) Gas pressure welding

Fig. 5 Non-linear wear rate as a function of contact pressure.

4-2. 경도와 마멸 깊이

레일 시편에서 마멸의 진행정도에 따라서 경도는 다르게 나타난다[9]. Fig. 6에서 보여

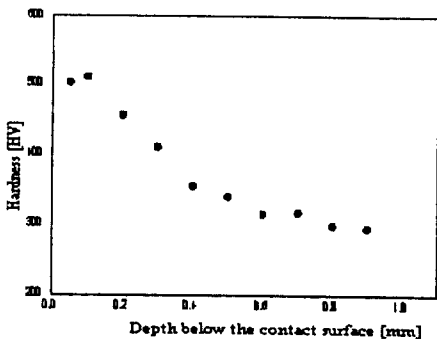


Fig. 6 Hardness profile below the surface of the rail disk.

주는 것처럼 레일의 두부 접촉면에 접한 곳에서 경도가 가장 높게 나타나고, 레일-휠의 접촉면으로부터 멀어짐에 따라서 경도 값은 떨어지는 현상을 보여준다. 그러나 일정한 깊이 0.8mm 이상에서는 레일의 표면 열처리 영향으로부터 떨어진 모재부에 도달하기 때문에 항상 일정한 경도값을 유지한다.

4-3. 경도와 마멸율

일반적으로 경도는 소재의 마멸특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 파라메타로 알려져 있다. 본 연구에서는 레일 용접부 소재의 마멸특성을 레일의 용접방식에 따라서 경도와 마멸율과의 관계를 상대적으로 비교·평가하였다.

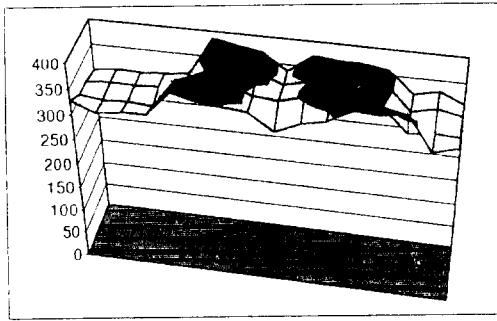
(가) 용접부의 경도분포 해석

Fig. 7은 테르밋 용접법으로 제작된 레일 용접부에 대한 경도분포를 제시한 결과로 열영향부에서는 $H_v=340\sim380$ 으로 가장 높은 경도(검은색 부분)가 열영향부와 모재 사이에서 발생하고, 가운데 용접부에서는 열영향부보다는 약간 낮은 $H_v=320\sim340$ 의 경도값을 나타내고 있다. 또한 열영향부의 좌우에 위치하고 있는 모재부에서는 $H_v=300\sim310$ 으로 안정된 경도값 보여주고 있다.

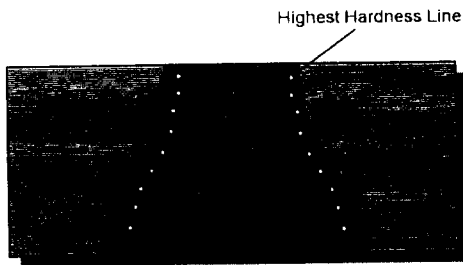
또한 가스 압접법으로 제작된 레일 용접부에 대한 경도분포는 Fig. 8에서 보여주는데, 레일과 레일이 만나는 용접부에서의 경도는 $H_v=320\sim350$ 으로 나타났고, 모재부에서는 $H_v=290\sim300$ 으로 테르밋 경우보다 약간 낮은 경도값을 보여주고 있다. 이것은 테르밋 용접법의 경우 레일 용접시의 열영향이 모재의 경도값에도 일부 영향을 미치기 때문이

다.

이들 두가지 용접법에 따른 경도분포를 비교하면 테르밋 용접 레일에서는 Fig. 7(b)에서 보여준 것처럼 시험편을 부식시키면, 열영향부, 용접부, 모재부의 경계가 분명하게 나타나고, 특히 최대 경도값은 열영향부와 모재가 접합하는 경계선을 따라서 나타나는 사실을 알 수 있다. 그러나 가스압접 레일의 용접선에서는 $H_v=320\sim350$ 의 높은 경도값이 Fig. 8(a)와 같이 나타나지만, 테르밋 용접재보다는 경도차가 상대적으로 낮게 나타났다. 이들 결과로부터 테르밋 용접 레일의 취약부는 열영향부와 모재사이의 경계선



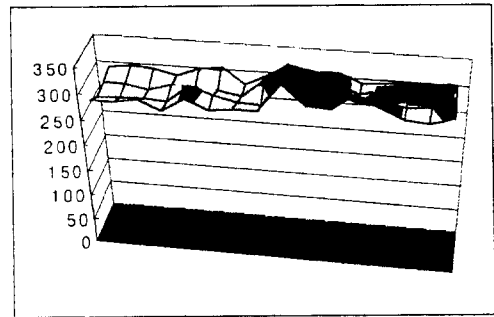
(a) Hardness distribution



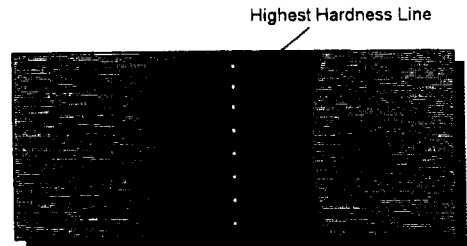
(b) Cross section of a welded zone

Fig. 7 3-dimensional hardness distribution and highest hardness boundary at the welded rail of a thermite welding.

이고, 이들의 상대적인 경도차는 좁은 범위에 걸쳐서 크게 나타나지만, 가스압접 레일에서는 테르밋 경우에 비하여 용접 열영향부의 폭은 넓으면서도 비교적 균일하게 분포되므로 용접부의 기계적 성질이 양호하고, 가스압접의 취약부는 레일과 레일이 접합하는 용접 경계선으로 나타났다.



(a) Hardness distribution



(b) Corrosion test

Fig. 8 3-dimensional hardness distribution and highest hardness boundary at the welded rail of a gas pressure welding.

(2) 마멸특성 해석

① 접촉하중과 마멸율

Fig. 9는 건조마찰에 대한 실험적 결과로 하중이 증가할수록 가스압접 레일이 테르밋 용접 레일에 비하여 마멸율은 분명하게 커지

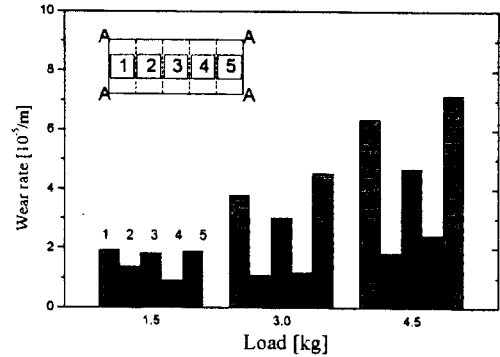
고 있음을 보여주고 있다. 여기서 접촉하중이 낮을 경우는 테르밋 용접을 한 시험편의 마멸율이나 가스압접의 경우나 큰 차이를 보여주고 있지는 않지만 용접 위치에 따라서 불균일한 마멸을 보여주고 있다. 그러나 접촉하중이 증가할수록 가스압접의 용접부에서는 전반적으로 급격한 마멸이 진행되고, 테르밋 용접보다는 가스압접의 용접부에서 비교적 균일한 마멸이 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9에서 제시한 실험결과에 따르면 테르밋 용접재는 가스압접 레일에 비하여 마멸율은 전반적으로 낮지만 레일에 가한 하중에 따라서 용접부, 열영향부, 모재부 등에 따라서 불균일한 마멸 경향을 보여주고, 가스압접의 경우는 마멸율은 비교적 높지만 용접부와 모재부에 따른 마멸특성이 비교적 안정화와 균일함을 보여주고 있다.

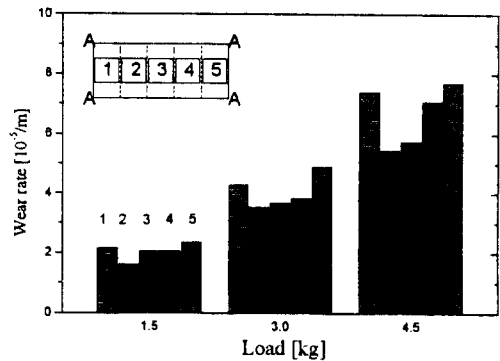
② 경도와 마멸율

테르밋 용접재의 경도에 따른 마멸율 관계를 Fig. 10(a)에서 제시되는데, 경도가 높은 열영향부에서는 마멸율이 낮고, 경도가 낮은 모재부와 열영향부가 만나는 경계점(Position 8)에서 특히 마멸율이 급격하게 상승하는 경향을 보여주고 있다. 여기서 특이한 점은 경도차에 따른 마멸율 변화가 크게 나타난다는 사실이다. 즉, 모재부와 열영향부 사이에서의 경도차가 크게 나타났지만 마멸율은 더 크게 측정되어, 결국에는 이곳을 중심으로 미세한 피로마멸이나 크랙이 발생될 수 있다는 근거를 제시한다.

가스 압접재에 대한 경도와 마멸율과의 관계는 Fig. 10(b)에서 제시하는데, 용접부와



(a) Thermite welding



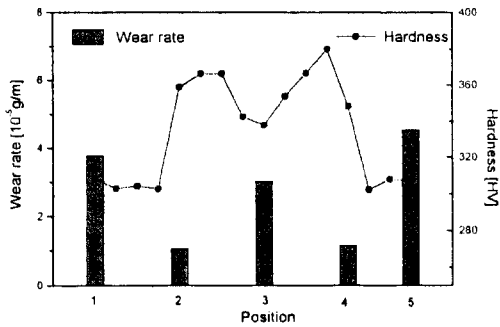
(b) Gas pressure welding

Fig. 9 Wear rate between thermite welding and gas pressure welding for a given contact load.

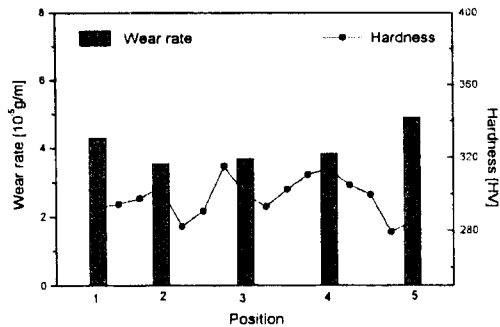
열영향부에 대한 경도는 테르밋 소재에 비하여 비교적 낮으나 용접부에서 가장 높고 경계가 불분명하며, 연속적인 경도변화 특성을 보여준다. 그 결과 마멸율 분포에서도 테르밋 용접에 비하여 높지만 상대적으로 균일한 결과를 보여주고 있다.

이들의 실험결과에 따르면 테르밋 용접은 경도차와 마멸율의 변화가 크기 때문에 반복 피로에 의한 마멸이나 크랙의 발생 우려가

높게 나타났다. 그러나 가스압접은 마멸율은 높으나 비교적 균일하게 발생하며, 경도분포가 상대적으로 균일하다는 사실이 피로강도와 마찰·마멸특성 측면에서 유리한 결과를 제시한다.



(a) Thermite welding



(b) Gas pressure welding

Fig. 10 Hardness and wear rate.

4. 결론

테르밋 용접과 가스압접으로 제작된 레일 시험편에 대한 경도와 마멸특성 관계를 실험적으로 고찰하였다.

테르밋 용접으로 제작된 레일 용접부에서 열영향부와 모재 사이의 경도차보다는 이 구역의 마멸율의 변화가 대단히 크므로 특히

열영향부와 모재 사이의 마멸이 크게 증가되고, 궁극적으로는 철도차량의 반복하중으로 인한 피로마멸 증가와 미세한 피로크랙으로 진전될 가능성이 대단히 높다. 이들 실험결과로부터 테르밋 용접 레일의 취약부는 열영향부와 모재 사이의 경계선에서 나타났고, 경도차는 좁은 범위에 걸쳐서 크게 나타나지만, 가스압접 레일에서는 용접부의 폭이 넓어지면서도 비교적 균일하게 분포되므로 기계적 성질이 양호하고, 접합의 취약부는 용접 경계선으로 나타났다.

테르밋 용접에서는 열영향부와 모재 사이의 경계선, 가스압접에서는 레일의 접촉선에 대한 균일한 플립 열처리와 연삭가공의 필요성은 레일의 유지보수와 장수명 측면에서 대단히 중요하다.

참고문헌

1. Roger, S., "In-Track Rail and Frog-Repair Welding," Railway Track and Structures, pp.25-28, 1994
2. Chung Kyun Kim, Nickolai K. Myshkin, et al., "Introduction To Tribology," Cheong Moon Gak, 1997
3. 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
4. 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
5. Bsck, T. A., Becker, P. C. and Rhee, S.

- Zirconias and Toughened Aluminas Against Steel," *Wear*, Vol. 110, pp.263-283, 1986
6. 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
7. Clayton, P., "Predicting the Wear of Rails on Curves from Laboratory Data," *Wear*, 181-183, pp.11-19, 1995
8. Hannafious, J., "FAST/HAL Rail Performance Test, Workshop on Heavy Axle Loads," Pueblo CO, paper 10, AAR, Oct. 1990
9. Tyfour, W. R. and Beynon, J. H., "The Effect of Rolling Direction Reversal on the Wear Rate and Wear Mechanism of Pearlitic Rail Steel," *Tribology International*, Vol. 27, No. 6, pp.401-411, 1994