

경두레일 용접부의 미끄럼 환경변화에 따른 마찰 및 마멸특성 연구

김청균 · 황준태
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Experimental Study on Friction and Wear Characteristics of Head Hardened Weld Rails Under Various Sliding Environments

Chung Kyun Kim, Jun Tae Hwang
Tribology Research Center, Hongik University

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 manufactured 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 : head hardened rail, welded rail, thermite welding, gas welding, water film, friction, wear

1. 서론

정해진 레일을 따라서 운행해야 하는 철도 차량은 자동차와는 달리 임의의 이동성이 없고, 반드시 계획된 스케줄에 따라서 순차적으로 움직여야 하므로 현재와 같은 교통체증 현상과 예상치 못한 사고에 용이하게 대처할 수 있는 철도차량은 정시 출발과 정시 도착이라는 장점 이외에도 높은 안전성을 갖고 있다.

철도운행에서 안전성을 확보해주는 중요한 핵심요소는 레일과 휠 상호간의 마찰력, 주변의 환경적 용인에 의한 이물질 개입정도, 마멸의 진행속도 등을 고려할 수 있다. 특히 국내에는 산악지대, 강변과 계곡 등이 많이 있는 관계로 레일의 설치도 이들의 지형에 따라서 건설되었기 때문에 레일과 휠 사이에

는 항상 물이나 습증기, 모래입자, 부식 물질 등이 개입될 소지가 많이 있다. 레일의 마찰 운동면에 건조마찰이 아닌 이물질의 침입에 의한 경계마찰의 지속은 마멸이나 부식을 빠르게 진행시키므로 굴곡이 많은 지역에서는 기존의 탄소강 용접레일보다 경두레일(head hardened rail) 사용을 추천한다.

최근에는 기존 철도차량의 고속화가 추진되면서 레일과 휠 사이의 마찰접촉 조건이 가혹해졌고, 그 결과로 마멸은 급속도로 진행되면서 운행 안전성이 크게 위협받고 있다. 더욱이 레일이 설치된 지역이 물이나 안개, 모래와 분진 등에 많이 노출된 경우는 레일과 휠 사이의 마찰접촉 거동특성이 균일하지 못하고 불안정해지면서 마멸은 가속되

게 된다.

또한 철도차량의 주행 안전성과 안락성을 확보하기 위하여 국내에서도 용접레일을 많이 사용하고 있는데, 철도차량의 고속화가 추진되면서 기존의 탄소강 용접레일과 용접 경두레일에서도 많은 문제점을 유발하고 있다. 레일은 차량이 지나가면서 주기적인 반복 충격하중을 받기 때문에 일반적으로 마멸에 의한 불균일 마찰 접촉이 일반적인 레일과 레일의 용접부에서는 환경적 요인에 의한 마찰과 마멸의 불안정성이 제기되고 있다[1-3].

따라서 본 연구에서는 기존의 탄소강 레일을 포함한 경두레일의 마찰 및 마멸특성을 환경적 요소를 달리하면서 고찰하고자 한다. 이 때에 레일의 용접은 테르밋 용접(thermite welding)과 가스 압접(gas pressure welding)의 두가지 방법을 이용하여 접합하였고, 기존의 탄소강 용접레일을 포함한 경두레일(HH 340과 HH 370)에 대하여 마찰 및 마멸 실험을 수행하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

실험에 사용된 마찰/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 시편을 Fig. 1의 A 구역에 설치하여 마찰 및 마멸실험을 실시하였다. 실험장치의 상부에는 스크류 방식으로 하중을 스프링에 가하고, 이 힘은 다시 시편에 수직으로 균일하게 가해진다. 로드셀은 시편에 가해지는 수직하중과 마찰력을 측정하도록 설치하였다.

그리고 축방향의 진동도는 0.02mm 이하가 되도록 하여 실험장치의 강성도를 확보하였다. 본 연구에서 미끄럼 마찰 속도를 0.2m/s로 고정하였는데, 이것은 속도의 변화가 마멸량이나 마멸율에 그다지 영향을 주지 않는다는 사실이다[4,5]. 특히 마찰력 변화에 따른 속도의 감소 변화를 방지하여 마찰, 마멸 특성 평가에 대한 신뢰도를 확보할 수 있도록 하기 위하여 서보 모터를 사용하였다.

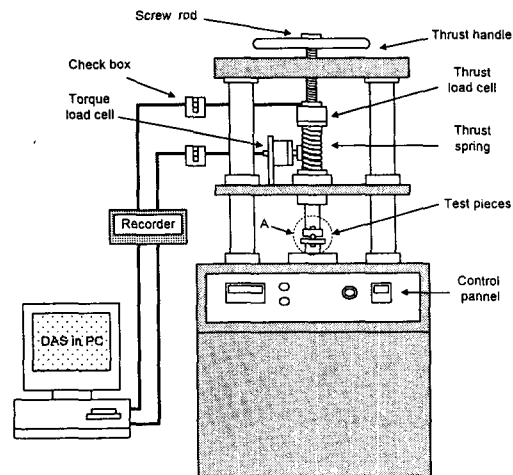


Fig. 1 Friction and wear testing apparatus

2-2. 시험편

핀-디스크 접촉방식의 마찰/마멸 시험기에서 사용한 표준시편은 5mm 두께를 갖는 29.5mm로 Fig. 3(a)와 같고, 핀은 10.2mm 직경의 강구(steel ball)이다. 레일의 마찰/마멸 시편은 레일두부 바로 아래의 용접부로부터 Fig. 3(b)와 같이 샘플링 하였다. 용접레일 시편은 레일의 용접부를 중심으로 좌우로부터 샘플링한 것으로 크게 용접부, 열영향부, 모재부의 3개 구역으로 나눌 수 있다. Fig. 4는 경두레일의 시편을 부식시킨 결과로 테르밋 용접재인 Fig. 4(a)는 용접부를 중심으로

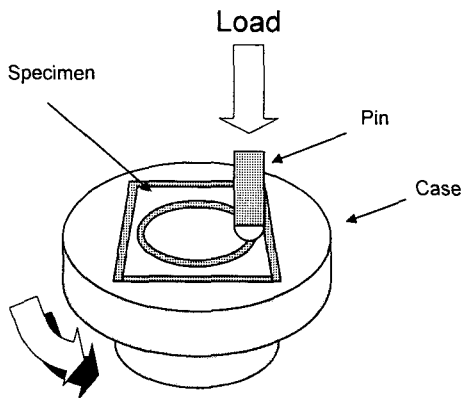
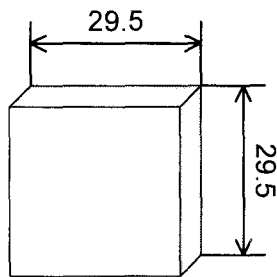
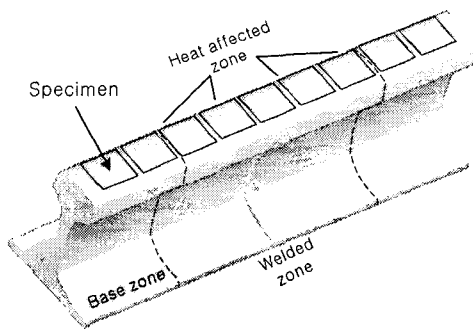


Fig. 2 Pin-on-disk contact model for a friction and wear tester



(a) Standard specimen

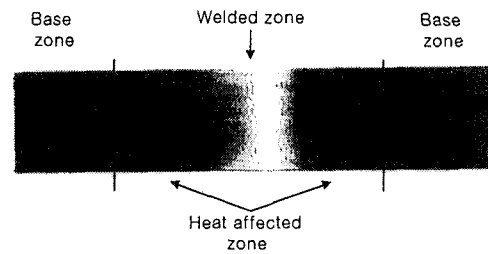


(b) Welded rail

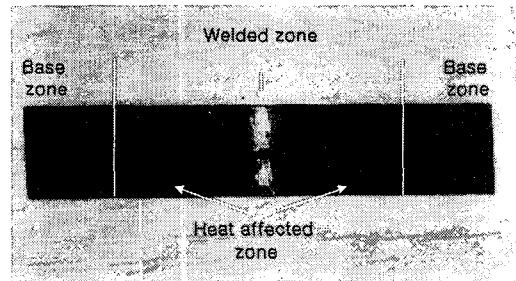
Fig. 3 Sampling of the welded rail specimens

분명한 경계선이 나타나는 반면, 가스 압접재인 Fig. 4(b)에서는 그 경계가 테르밋 용접재에 비해 불분명하게 나타났다.

마찰/마멸 시험평가에 사용된 탄소강 레일, HH 340 및 HH 370의 경두레일 시편에 대한 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 2에서 각각 제시하고 있다. HH 340과 HH 370은 레일 두부의 열처리 경화정도를 브리넬 경도로 표시한 값으로 종래의 경두레일에 비하여 열처리 깊이가 깊고, 열처리 경화층이 미세 펄라이트 조직을 하고 있으므로 내마멸성이 우수한 특징을 갖고 있다.



(a) Thermite welding



(b) Gas pressure welding

Fig. 4 Cross section of welded zone for thermite welding and gas pressure welding

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

2-3. 실험방법 및 실험조건

레일이 설치된 주변의 환경적 요인에 따라서 용접레일과 휠에서의 마찰접촉은 물이나 습증기, 모래입자 등에 의하여 오염될 우려가 많다. 그래서 용접레일과 휠 사이의 마찰접촉은 건조마찰 뿐만 아니라 습증기, 모래와 같은 외부의 이물질이 혼입된 접촉조건에서 탄소강 레일과 경두레일 용접부의 마찰 및 마멸특성을 고찰하고자 한다.

철도차량 중량이 39톤 정도임을 고려한 실제 마찰실험의 접촉면압은 760MPa이다. 이 데이터를 Hertz의 실제 접촉 면적식으로 환산하여 제시한 접촉하중이 15N이기 때문에 이 하중을 기준으로 접촉하중을 30N, 45N으로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 이 때에 사용된 이론적인 접촉조건은 Fig. 5와 같은 구-평판 접촉의 Hertz 접촉 이론식[6]을 이용하여 계산하였다. 즉,

$$a = \left(\frac{3WR_A}{4E} \right)^{1/3}$$

본 실험에서는 각각의 실험조건에 대하여 5분간씩 지속하였다. 여기서 실험시간은 3~5분 정도면 마찰계수가 안정화에 도달하기에 충분한 시간이다[7,8]. 시편에는 항상 동일한 실험조건을 적용한 상태에서 3~4회 반복 실험치를 평균한 것으로 반복성이 높다.

마찰/마멸실험에 사용한 시편의 회전속도는 0.2m/s이고, 마멸실험에서 속도를 0.2m/s 이상으로 증가시키게 되면 빠른 회전속도에

의하여 마찰면에서는 이상진동이 발생하므로 진동에 의한 접촉마멸이 급속하게 증가하는 문제점을 갖고 있다.

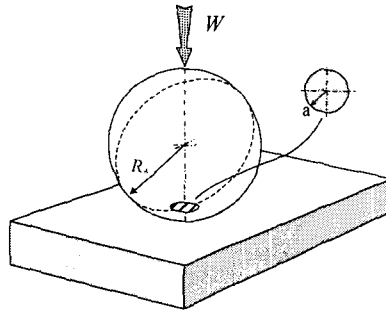


Fig. 5 Schematic of sphere on plane contact model

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마찰특성 해석

레일과 휠의 저속도 미끄럼 마찰에서 접촉 환경이 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. 6~9에서 각각 보여 주고 있다.

Fig. 6은 각 접촉환경에서 나타나는 마찰토크의 전형적인 패턴을 나타낸 것이다. 레일을 테르밋 용접과 가스압접으로 접합한 두 가지 경우에 대한 마찰특성 결과는 환경적 요소가 다르다 할지라도 유사한 경향을 보인다.

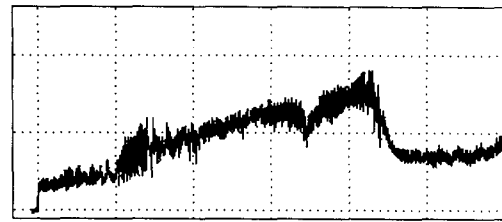
즉, 건조 마찰접촉 상태의 일반적인 마찰 패턴을 보여주는 Fig. 6(a)에 의하면 초기의 마찰은 가스막층과 산화막층이 깨지면서 초기 마찰계수는 불안정하게 상승하고, 이후에는 안정적인 마찰 토크를 나타낸다.

수막(water film) 또는 습증기막(vapor film)

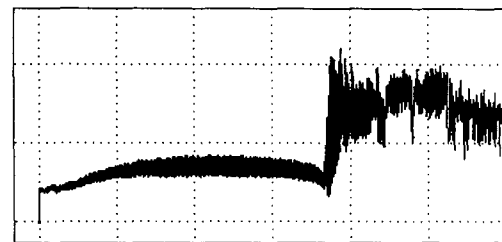
이 있는 마찰접촉 상태를 보여준 Fig. 6(b)의 실험결과에 의하면 초기의 마찰은 마찰면에 존재하는 습증기나 물에 의한 수막에 의하여 마찰계수가 균일하게 지속되다가 마찰열의 과도한 축적으로 인한 마찰 접촉조건이 불안정해지면서 마찰계수는 급격하게 상승하고, 차후에는 마찰계수가 초기보다는 약간 높게 유지된 상태에서 지속적으로 균일해지는 현상을 보여준다. 여기서 마찰접촉 상태가 정상상태에 도달하면 접촉환경에 관계없이 유사한 마찰패턴을 보여주지만, 마찰계수가 급상승하는 천이구역에서 습증기나 수막이 깨질 경우 탈락된 마멸입자에 의하여 더욱 불안정한 마찰특성을 보여주고 있다. 이러한 천이구역에서는 수막이 깨지면서 경계마찰 또는 고체마찰로 변화된다. 그 결과 미끄럼 마찰면에서의 마찰계수는 증가되었다가 미끄럼 마찰이 안정화되면 균일해지는 현상을 보여준다.

미세한 모래입자가 개재된 마찰접촉 상태를 보여준 Fig. 6(c)의 결과에 의하면 건조마찰이나 습증기 마찰의 경우에서 나타났던 초기 마찰구간이 거의 발견되지 않았고, 초기 마찰계수가 급격하게 증가되면서 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.

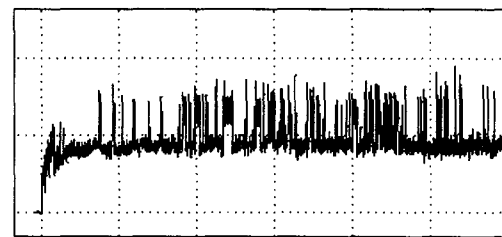
Fig. 6의 마찰특성 결과에 의하면 용접레일에서의 초기 마찰계수는 테르밋 용접이나



(a) Dry condition



(b) Wet condition



(c) Sand condition

Fig. 6 Typical pattern of friction torque for various environments

가스압접에 관계없이 접촉환경에 크게 의존하고 있으며, 건조마찰과 습증기 마찰의 경우는 시간이 경과함에 따라서 유사한 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 나타나다가 안정된다는 사실을 알 수 있다.

여기서 제시한 마찰패턴은 테르밋 용접레일이나 가스압접 레일에 관계없이 유사하게

나타났고, 이들에 대한 구체적인 실험 데이터는 Figs. 7~9에서 제시한다.

Figs. 7~9는 용접레일에 15, 30, 45N의 접촉하중을 적용했을 때 접촉환경 변화에 따른 마찰 토크를 제시한 결과로 각각의 그림에서 왼쪽은 테르밋 용접레일, 오른쪽은 가스압접 레일에 대한 실험 데이터를 각각 제시한 것이다.

건조 마찰에서 측정된 마찰 토크는 Fig. 7에서 제시한 것처럼 테르밋 용접레일이나 가스압접 레일에 관계없이 유사한 마찰특성을 보여주고 있다. 즉, 탄소강 용접레일에서는 초기의 마찰계수가 높게 나타났다가 안정화를 이루는 반면에, 경두레일에서는 저하중에서는 안정된 초기마찰 상태를 보여주다가 마찰계수가 서서히 증가하면서 안정화를 이루

고, 이후에는 탄소강 레일과 경두레일의 마찰특성이 거의 유사해지는 경향이 있다.

또한 습증기나 수분이 개재된 미끄럼 마찰 접촉의 마찰특성을 테르밋 용접레일과 가스압접 레일에 대하여 제시한 Fig. 8에 의하면 초기의 마찰접촉 상태는 건조마찰에 비하여 낮고 대단히 안정적이다가 증가하는 형태를 보여주고 있다. 즉, 탄소강 용접레일에서는 초기의 마찰특성이 안정적으로 유지되다가 마찰계수가 급상승하고, 그 이후에는 다시 안정된 마찰특성을 보여주고 있다. 그러나 경두레일에서는 초기의 마찰특성이 탄소강 레일보다는 균일한 표면경도의 영향으로 더 안정적이다가 시간이 경과함에 따라서 마찰계수가 증가된 상태에서 탄소강 레일처럼 안정화를 이룬다.

Fig. 9는 마찰계면에 미세한 모래입자를 공급하여 마찰접촉 실험을 수행한 결과로 마찰거동 특성은 마찰운동 계면에 있을 가스막, 산화막, 수막 등에 의한 초기의 마찰 안정정보다는 미세 마멸입자에 의하여 지배받는 것으로 나타났고, 레일표면의 경도나 레일의 용접법보다는 미세 마멸입자의 영향이 대단히 큰 것으로 나타났다.

여기서 제시한 실험적 결과에 의하면 탄소강 레일의 경우는 마찰계면에 있는 가스막이나 산화막층이 쉽게 파손되면서 마찰계수가 급격하게 상승하였다가 안정화를 찾아가는 경향이 있다. 그러나 HH 340과 HH 370의 경두레일에서는 이러한 박막층이 손상을 받는다 할지라도 레일의 두부에서는 경도가 높으면서도 분포도가 균일하기 때문에 초기에는 가스막이나 산화막층에 의하여 일정시간 동안 안정된 마찰상태를 지속하다가 미끄럼 마찰시간이 증가하면서 마찰토크는 서서히 상승하면서 안정화를 이룬다. 이것은 기존의 탄소강 레일과는 다른 마찰거동 패턴이다.

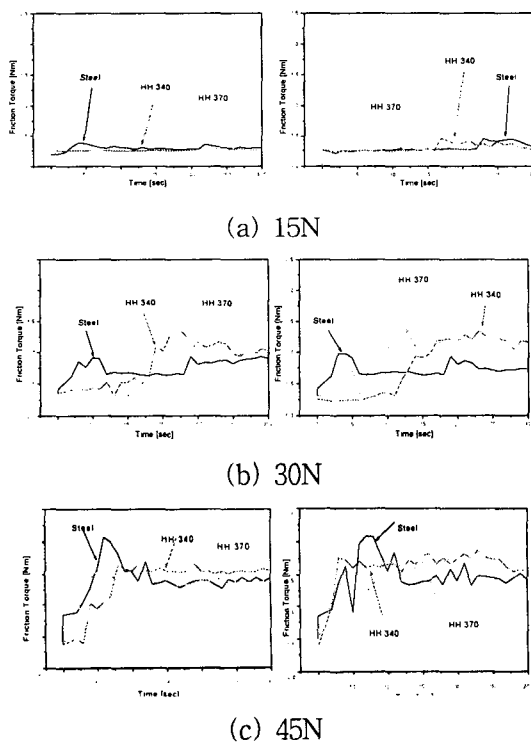


Fig. 7 Friction torque distribution for a dry contact mode in thermite and gas pressure welded rails

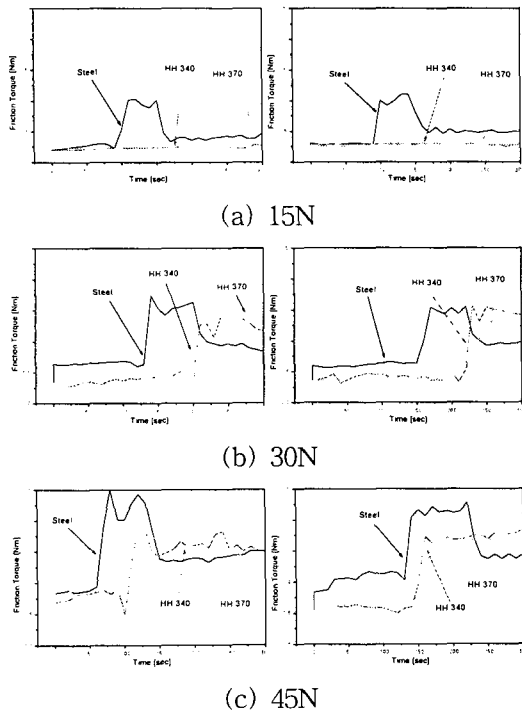


Fig. 8 Friction torque distribution for a wet contact mode in thermite and gas pressure welded rails

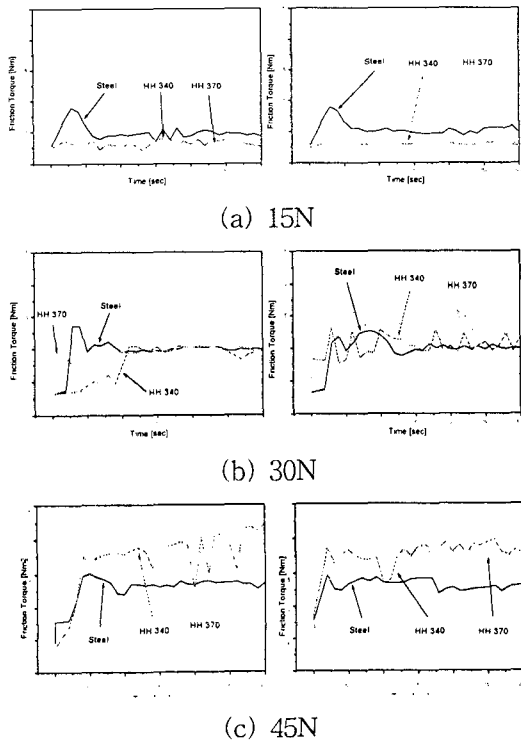


Fig. 9 Friction torque distribution for a sand contact mode in thermite and gas pressure welded rails

3-2. 마멸특성 해석

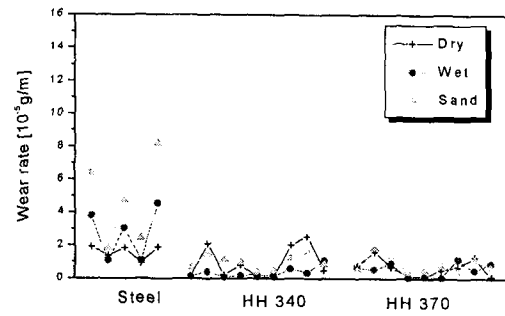
용접레일과 휠 사이에 15, 30, 45N의 접촉 하중이 작용하고, 공기만 있는 건조마찰 상태에 습증기나 물이 개입된 경계마찰, 미세 모래입자가 혼입된 마찰조건에 대한 마멸율의 변화를 Figs. 10과 11에서 각각 나타내고 있다. 여기서 레일의 용접부를 중심으로 제작된 시편에 대한 마찰, 마멸시험은 탄소강 용접레일, HH 340 경두레일, HH 370 경두레일의 세가지에 대하여 수행하였다.

Fig. 10에서 보여준 결과처럼 테르밋 용접 레일에 가해진 하중이 증가할수록 마찰접촉 환경에 따라서 서로 다른 특성을 보여주고 있다. 즉, 탄소강 용접레일에서는 저하중보다는 고하중에서, 그리고 모래입자가 개입된 경우가 보다 많은 마멸을 일으키고 있다. 이것은 경도가 높은 모래입자가 레일 마찰면에 개입되어 연삭마멸을 증대시키기 때문이다. 습증기가 개입된 마찰 초기에는 수막(water film)을 형성하여 마찰력을 저감시키는 긍정적인 효과를 기대하나, 하중이 증가함에 따라서 수막이나 산화피막이 파괴되고, 수막속에 마멸입자가 혼입하게 되어 마멸은 오히려 증가하는 경향을 보여주고 있다.

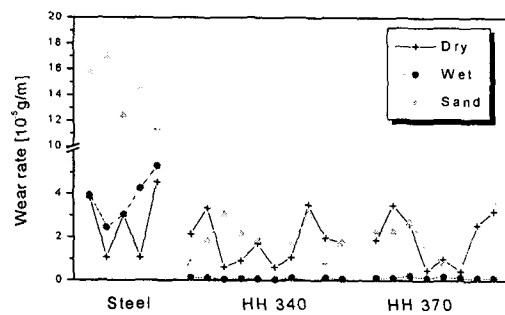
또한 HH 340과 HH 370의 경두레일에서는 탄소강 레일에 비하여 마멸율이 대단히 낮으나 HH 340과 370의 경두레일 상호간에는 큰 차이를 나타내지는 않는다. 경두레일의 마찰면에 수분이 있는 경우는 하중의 변화에 관계없이 대단히 안정적인 마멸특성을

나타내지만, 건조마찰이나 특히 모래입자가 혼입된 경우는 마멸특성이 불안정하면서 마멸율이 높게 나타났다. 이것은 경두레일의 경도가 높으면서도 균일하기 때문에 마찰면에 형성된 수막이 윤활작용을 효과적으로 제공하는 것으로 생각된다. 또한 미세 모래가 혼입된 경우 탄소강 레일에 비해 극히 양호한 마멸 특성을 보인다

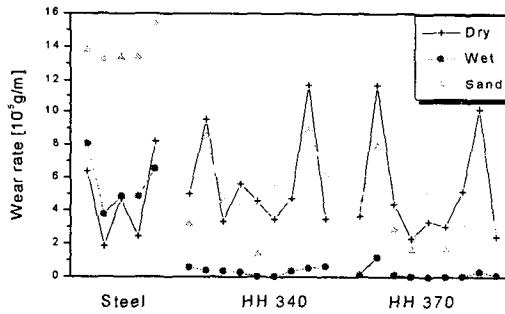
가스압접에 대한 마멸율을 제시한 Fig. 11의 결과에 따르면 전반적으로는 테르밋 용접 레일의 경우와 유사하나, 마멸율이 약간 높게 발생되었고, 대단히 안정적인 마멸패턴을 보여주고 있다. 즉, 탄소강 용접레일에서는 모래입자가 개입된 접촉환경에서는 연삭마멸에 의하여 가장 높은 마멸이 발생되었고, 수분이 있는 경우는 경계 윤활작용으로 유리한 것 같지만 발생된 마멸입자가 외부로 빠져나가지 않고 세물체 연삭마멸(three-body abrasive wear)과 부식마멸을 일으켜서 오히려 마멸을 증가시키는 원인으로 작용하고 있다. 그러나 경두레일에서는 마찰 접촉운동면에서의 경도가 높고 균일하기 때문에 미끄럼 마찰면에서 발생하는 마멸율이 낮으므로 수분에 의하여 경계 윤활작용을 하는 것으로 나타났다. 그 결과 수분이 있는 경우에는 마멸율이 대단히 낮고, 모래입자가 있든지 또는 건조마찰을 하는 경우에 마멸율이 높게 나타났다. 그러나 이것은 탄소강 용접레일에 비하여 매우 낮은 수치로, HH 340과 HH 370의 경두레일이 탄소강 용접레일에 비해 가혹한 접촉환경에서 매우 안정적이라 할 수 있다. 이것은 경두레일의 경도가 높으면서도 레일과 휠의 마찰 접촉면에서 안정적인 분포도를 나타내기 때문이다.



(a) 15N

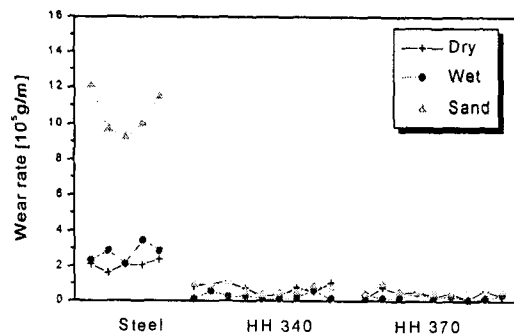


(b) 30N

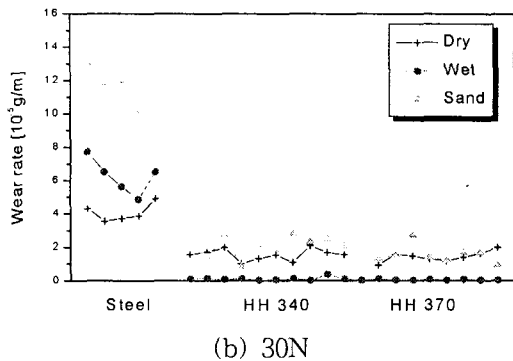


(c) 45N

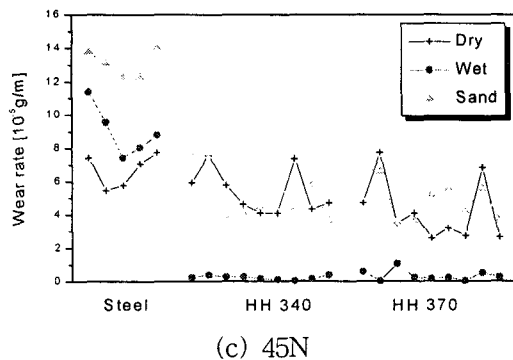
Fig. 10 Wear rate distribution of thermite welding rail for various environments



(a) 15N



(b) 30N



(c) 45N

Fig. 11 Wear rate distribution of gas pressure welding rail for various environments

4. 결론

탄소강 레일과 경두레일을 테르밋 용접과 가스압접으로 제작하여 마찰/마멸 시험기로 마찰접촉 환경을 변화시켜가면서 마찰·마멸 특성을 고찰하였다. 실험결과에 의하면 마찰 환경이 변하여도 경두레일에서의 마멸은 탄소강 레일에 비하여 낮고 안정적이다.

경두레일의 마찰면에 게재된 습증기나 물에 의한 수막은 마멸을 감소에 도움이 되지만, 탄소강 레일에서 수막은 추가적인 연삭 마멸이나 부식마멸의 급격한 증가로 부정적인 영향을 미치고 있다. 전반적으로 가스압접 레일에서도 테르밋 용접레일과 유사한 경향을 나타내지만 가스압접으로 제작된 경두레일 용접부에서의 마멸특성이 대단히 안정적으로 나타났다.

참고문헌

- [1] 김청균, 황준태, 나성훈, 민경주, "레일 용접부의 미끄럼 환경변화에 따른 마찰 및 마멸특성 연구," 한국윤활학회 제28회 추계 학술대회, pp.59-66, 1998.
- [2] Clayton, P., Allery, M. B. P. and Bolton, P. J., "Surface Damage Phenomena in Rails. Int. J. Kalousek, R. V. Dukkupati and G. M. L. Gladwell(eds.), Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, University of Waterloo Press, Waterloo, 1983.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Chung Kyun Kim, et. al, "Introduction to Tribology, Cheongmoongak Pub., 1997.
- [7] 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.
- [8] 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.