

철도차량 윤축과 레일의 피로손상



| 권석진, 이동형, 서정원, 전현규 |
한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

최근 철도차량과 궤도시스템은 고속화와 최적화가 이루어지면서 상당한 기술적 진전이 이루어지고 있다. 그러나 기술이 첨단화되어 가면서 이에 따른 피로손상과 고장도 필연적으로 동반되어 나타나고 있다.

철도차량과 궤도는 장기간에 걸쳐 하중을 받으면서 사용되기 때문에 피로파손 현상을 피할 수 없다. 피로손상에 의한 사고와 고장을 사전에 방지하기 위하여 각각의 차량과 궤도 시스템에 대하여 피로손상의 파악, 강도평가와 모니터링 기술의 확립이 필요한 실정이다. 이러한 연구와 조사를 통하여 차량-궤도 시스템의 설계와 제작이 이루어지며 사용 중에 정기적인 검사를 실시하면서 피로손상에 기인하는 사고와 고장을 미연에 방지하는 노력을 한층 더 강화하여야 한다. 본 고에서는 철도차량의 윤축과 레일의 피로손상의 현상과 평가기술에 대하여 서술하고자 한다.

1. 철도차량 차륜의 피로손상

차륜에서 피로균열성장은 구름접촉피로와 제동마찰열에 의한 결과로 차륜의 부분손실이나 반경방향 균열진전을 발생시킨다. 이러한 결함의 발생 및 진전의 결과는 차량부품의 손상 또는 심지어 탈선을 일으킬 수 있다. 차륜의 손상형태는 다음 3가지로 크게 구분할 수 있다.

찰상(flat)은 제동력이 초과되면서 차륜이 레일 위를 활주한 결과 발생하는 손상이다. 차륜접촉면의 과열 이후의 빠른 담금질과정으로 인해 접촉면의 퍼얼라이트강이 매우 취성을 가지는 마르텐사이트로 변태된다. 작은 량의 찰상에도 피로결함의 발생 또는 타원형 차륜으로 변형될 수 있다. 활주상황의 차이에 따라 답면 일부가 원형 또는 타원형으로 평탄화 되거나 찰상이 반점형태로 연결되어 발생하며 파상 또는 띠상의 소성유동이 연속적으로 발생한다. 일반적으로 발견시에는 박리를 동반한다.

박리(shelling, spalling)는 구름접촉피로에 따라 답면의 일부 또는 차륜의 전 원주에 걸쳐 발생하는 표면결함 현상이며 높은 응력과 견인력이 차륜답면에 반복 축적되면서 작용하는 하중방향으로 얇은 표면층이 이동하는 것이다. 즉, 소성적으로 유동하는 표면층은 변형경화 되고 결국 파손되며 표면균열이 발생한다. 일단 균열이 발생하면 균열은 일련의 하중을 받으면서 진전하며 다른 인접균열과 합체되어 표면에서 박리 현상이 발생하게 된다. 박리는 과대한 윤증, 차륜재의 강도부족, 또는 활주에 따라 발생하기 쉽지만 일반적으로 찰상과 열균열 등의 손상을 기점으로 발생하는 것이 많다.

열균열(thermal crack)은 제륜자의 마찰에 의한 답면 및 플랜지에 열균열이 발생하는 것이다. 열균열은 수많은 미세한 균열이 그물모양으로 발생하는 상태이며 축방향으로 비교적 길게 진전되는 상태의 균열이다. 레일과 접촉함에 따라 차륜원

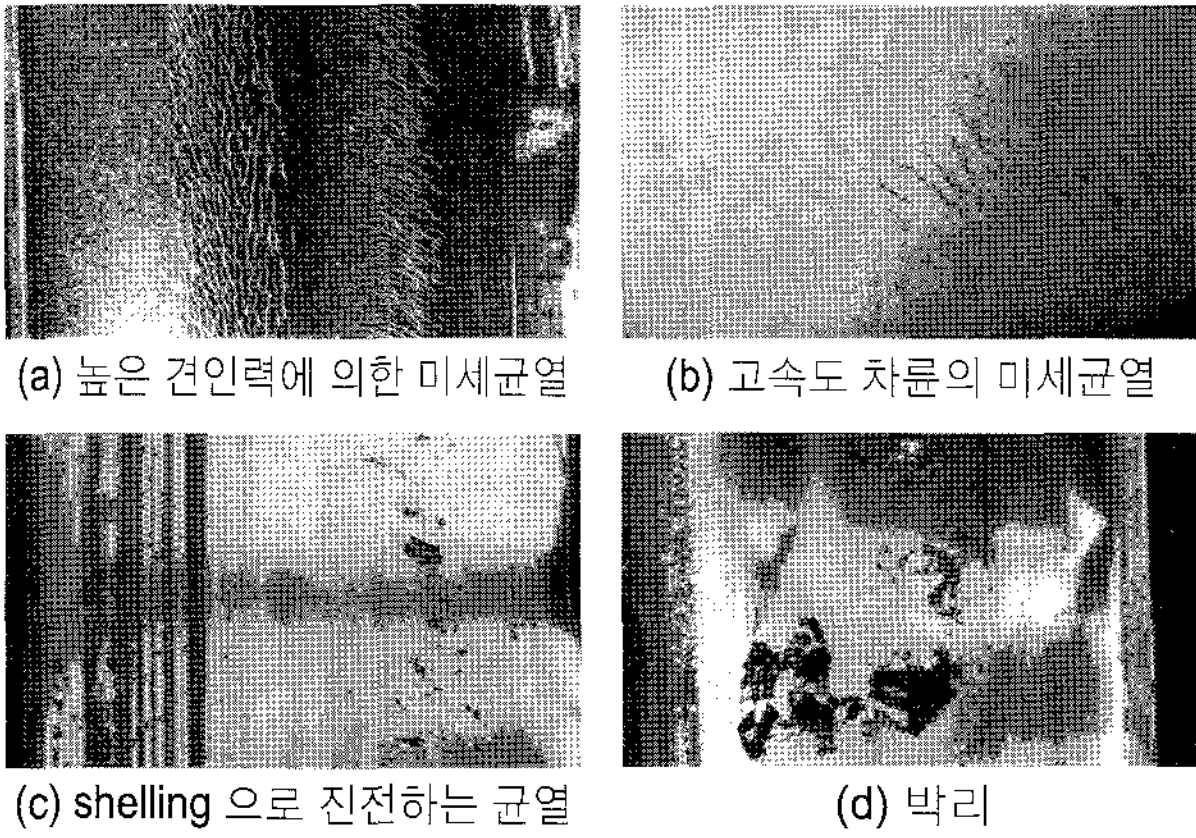


그림 1 차륜담면에서 발생하는 손상의 종류

주에 걸쳐 플랜지부분에 발생하는 균열. 특히 답면제동식 차륜에서는 제륜자 외곽부의 열영향으로 발생하는 경우가 많다.

그림 1은 차륜담면에 발생하는 여러 가지 손상형태를 나타낸 것이다. 차륜에 대한 국내외 연구 현황은 차륜의 손상형태에 따른 손상 발생메커니즘, 손상평가와 손상을 검지하는 모니터링 기술에 관하여 연구가 진행 중에 있다.

2. 철도차량 차축의 피로

차축의 피로강도에서 가장 중요한 부분은 차륜과의 압입부이다. 차축의 차륜, 기어, 베어링내륜 등의 압입부에서는 운행 중에 상대적 접촉으로 인한 반복적인 미끄럼 현상이 발생한다. 이러한 것을 압입 피로(fretting fatigue)라 하며 이러한 프레팅 피로의 결과로 부재에 발생하는 마모를 프레팅 마모, 부식을 프레팅 부식, 균열발생은 프레팅 피로라 하며 이러한 것을 종합적으로 프레팅 손상이라 한다.

차축이 차륜에 압입되어 회전할 때 완전하게 같이 회전하지 않는다. 그림 2와 같이 차륜과 차축접촉면의 압입부에 미세한 간격이 발생하며 축 방향으로 상대적인 미끄럼이 발생하게 된

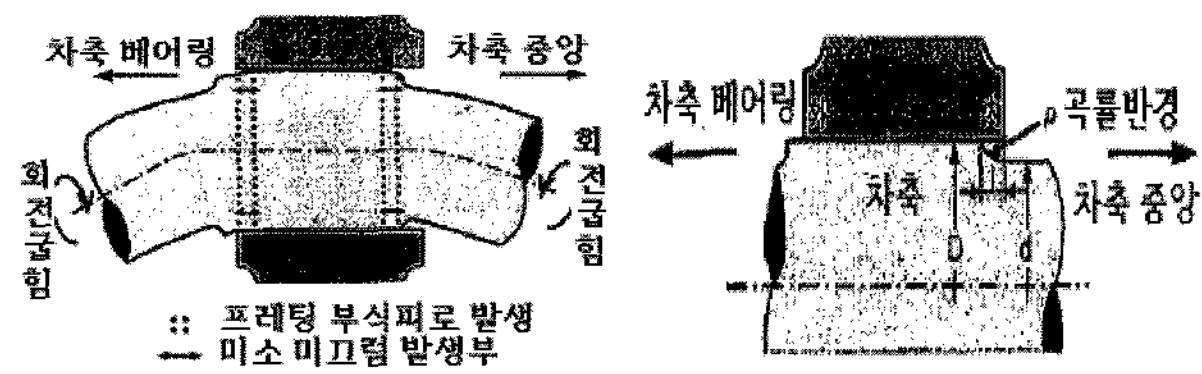


그림 2 프레팅 피로의 발생메커니즘

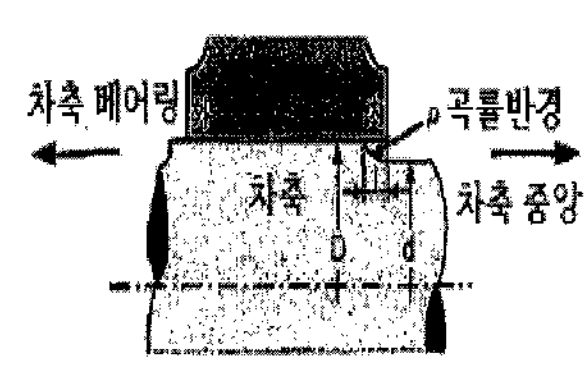


그림 3 손상방지를 위한 차축의 형상 설계

다. 이러한 미끄럼 량(이른바 상대변형 진폭)은 일반적으로 10 μm 내외이다. 프레팅 피로강도 향상을 위한 효과적인 방법은 그림 3과 같이 차축단부의 형상을 변경하여 접촉면압을 높임으로서 결과적으로 상대적인 변형량을 감소시키는 것이다.

현재 일본과 유럽에서는 차축의 취약부인 차륜과의 압입부에 대한 피로시험, 피로강도 향상방법 등의 연구가 다수 진행되고 있다.

3. 레일의 피로

레일의 피로는 차륜의 충격하중에 의한 레일 이음매 및 용접이음매의 피로손상과 차륜의 구름하중에 의한 레일두부 및 게이시코너의 구름접촉피로손상이 문제가 된다. 2000년 영국에서 곡선부 레일에서 구름접촉피로에 의한 레일 파손에 의한 탈선사고가 발생하였다. 이러한 사고를 계기로 게이시 코너부의 구름접촉피로 손상에 대한 보수관리와 게이시코너의 박리로 인한 소음을 억제하는 관리방법이 새롭게 연구되기도 하였다. 이러한 균열은 궤도검측차에 의하여 균열 탐상이 쉽지 않기 때문에 발견이 가능한 연구개발이 진행되어야 한다.

레일-차륜접촉의 형태는 중요한 역할을 한다. 레일과 차륜 사이의 일상적인 접촉은 힘이 상대적으로 낮은 접촉영역에 전달되기 때문에 적은 마모를 발생시킨다. 적은 마모 때문에 최대응력은 큰 하중 사이클 동안에 레일두부에서 같은 위치에 있게 된다. 레일은 그 위치에서 피로를 받게 되고 손상이 일어날 수 있다. 2점 접촉의 경우, 차축과 원심력은 다른 위치에서 레일로 전달된다. 윤활이 작용하지 않는다면 게이시 코너에서 슬립 때문에 마모는 증가한다.

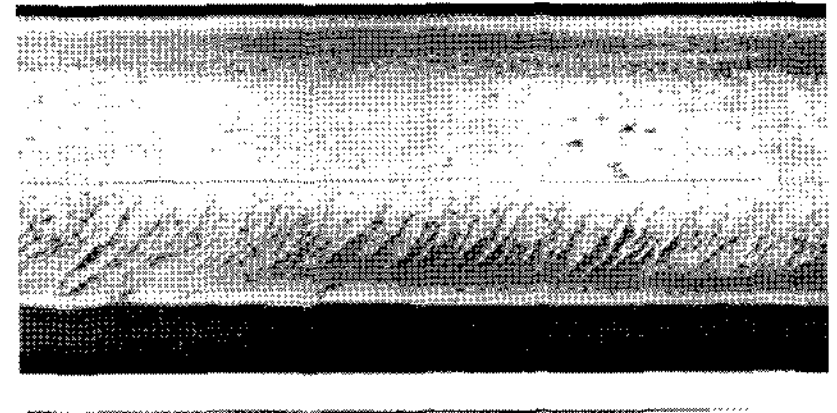
1점 접촉은 일반적인 접촉과 2점 접촉사이에 있으며 중간정도 마모수준을 가지고 피로손상도 중간정도의 경향이다. 삭정과 윤활과 같은 유지보수 방법은 3가지 접촉형태에 따라 고장모드로 변화한다. 윤활은 마모를 감소시키지만 강은 일반적인 접촉의 손상과 유사한 피로손상을 받게 될 것이다. 응력이 높은 영역이 레일을 통해 연속적으로 이동하는 만큼 삭정은 마모와 같은 효과를 가지며 피로손상은 발생하지 않게 된다. 표면에서 반복 소성변형 때문에 냉간가공 표면층이 발생하며 소성변형은 접촉 형상, 하중, 레일 경도에 의존한다. 응력구배는 소성적으로 응력을 받지 않는 재료의 경계영역에서 발생하며 미세균열은 그곳에서 형성될 수 있다.



(a) shelling



(b) squat



(c) head check

그림 4. 레일의 손상형태

레일의 피로 및 파괴현상은 레일이 직선운동, 곡선운동 및 열차가 한 방향으로 운행되는지 또는 양방향으로 운행되는지, 용접부의 유무, 분기기 그리고 복잡한 하중, 계절별 환경적 현상 등 많은 인자로 인하여 대단히 복잡하다. 레일에서도 주변의 온도변화와 레일 신축에 의한 잔류응력과 제작과정 중의 잔류응력 그리고 차륜-레일 접촉에 의한 잔류응력의 재분포 등이 피로파괴에 큰 영향을 미친다. 레일에 발생하는 대표적인 결함의 형태는 그림 4에 나타나 있다.

만약 비금속 개재물과 같은 재료결함이 최대 전단영역에서 존재하면 미세균열은 그곳에서 형성되기 시작한다. 이것은 금속학적 결함이 구름접촉피로라는 손상에 포함된 유일한 경우이다. 이러한 형태에서 형성된 균열을 shell이라고 한다. 만일 균열이 큰 응력구배 때문에 형성되었다면 냉간가공된 표면층이 점점 취성화 되기 때문에 균열은 표면으로 성장한다. 금속 조각들이 표면에서 떨어져 나가며 이러한 것을 shelling이라 한다. 만일 shell이 비금속 개재물에서 발생한다면 균열은 처음에 길이방향으로 진전하지만 곧 수직방향으로 성장한다. Shelling은 게이지 코너 표면하 균열이 진전하여 떨어져 나가는 현상으로 곡선부의 외측레일에서 주로 발생한다. Head check은 0.5~0.7 mm 간격으로 게이지 코너에서 발생하는 미세한 균열군으로 레일표면의 냉간 가공경화에 의해 발생한다. 한 방향으로 운행되는 곡선부 외측레일에서 발생하며 경우에 따라서 양 방향으로 운행되는 직선부에서도 발생된다. Head check은 원심력과 레일-차륜사이에서 미세슬립으로 인하여 바깥쪽 레일의 게이지 코너에서 발생한다. head check의 형상은 직접적으로 운행방향과 차륜 플랜지의 이동에 관계가 있다. 만일 head check이 성장한다면 유사한 결함들과 합체될 수 있으며 금속조각들은 표면에서 떨어져 나갈 수 있다. 이것을

spalling이라 한다.

최근의 결함형태는 squat이다. Squat는 큰 곡선반경 선로는 물론 직선 선로 특히 고속구간에서 나타난다. Squat는 운행표면에서 검은 반점으로 나타나지만 상당한 크기의 균열이 하부에 존재한다. Squat의 얇은 표면침하는 균열성장을 촉진시키는 동적인 힘의 증가 원인이 된다.

Transverse cracks는 shelling, squats, head checks 그리고 다른 결함들이 횡방향 균열로 진전하는 경우이다. 이러한 결함은 모든 레일에서 발생하며 특히 오래된 레일과 용접레일에서 발생하기 쉽다. Detail 파괴와 같은 손상발생은 주어진 하중조건에 대해 개재물과 같은 임계치수를 계산하는 파괴역학에 의하여 모델화할 수 있다. 이러한 결함형태의 발생은 주기적인 UT검사에 의해 모니터링 될 수 있으며 레일은 결함이 임계치수에 도달하지 전에 교체될 수 있다. 만일 균열이 표면에 존재한다면 쉽게 검출되지만 비파괴 검사방법에 의한 결함 깊이를 결정하는 것은 어렵다.

4. 결론

철도시스템에 대한 기술적인 진보와 설계방법의 개선이 계속적으로 이루어지고 있지만 피로현상에 의한 손상과 사고는 끊임없이 발생하고 있다. 철도시스템에서 파손 현상에 대한 원인 발생과 기술적인 대책이 이루어지지 않을 경우에는 막대한 인명과 재산 피해가 뒤따르는 사회적인 책임이 도래하게 된다. 따라서, 부재에 대한 정확한 강도평가와 적절한 모니터링 기술이 사고, 손상을 방지하는 유일한 대책이라 할 수 있다. ☺