

레일 손상의 예방 대책



서 사 범

한국철도시설공단
일반철도궤도처장/
공학박사·철도기술사

1. 머리말

레일은 실제 사용 시에 각종의 원인으로 손상이 생긴다. 레일의 파손은 일반적으로 피로균열 성장의 최종 결과이다. 균열은 작은 손상, 또는 응력 집중으로 생긴다. 이 이유 때문에 파손이 일어나기 전에 균열을 발견할 수 있는 기회가 상당히 있으며, 초음파 검사도 일반적으로 행하고 있다. 본고에서는 레일손상의 예방대책 중에서 레일의 연삭과 윤활을 중심으로 최근의 기술 발전에 대하여 소개한다.

2. 레일 손상과 예방의 정의

레일이 손상되는 것을 어떻게 방지하느냐는 레일의 유지관리에 있어 극히 중요한 과제이다. 여기서, '손상' 이라는 정의는 손상의 어감에서 '흠'의 이미지가 강하고 '마모'를 포함하는지에 의문이 든다. 이와 관련하여 예전에

보고된 레일손상 통계보고의 분류에서는 여러 가지의 '흠'이 포함되어 있기는 하였으나 '마모'는 포함되어 있지 않았다. 한편, 국제철도연합(UIC)의 레일 손상 카탈로그에는 '마모'가 포함되어 있는 등 세계적으로 '손상'의 정의가 명료하지 않다. 그러므로, 본고에서는 '손상'을 보다 넓은 의미로 받아들여 UIC와 마찬가지로 '마모'도 포함하여 레일의 비정상 상태 전반을 가리키는 것으로 한다.

다음에 '예방'의 정의이지만 '미리 막는다'라고 하는 의미에서 전동접촉 피로손상(차량의 전동 하중을 반복하여 받음에 따라 발생하는 피로 손상의 하나)인 레일의 쉐링과 같은 피로 균열을 방지하는 경우는 '예방'이라고 하는 어구가 익숙하지만, 예를 들어 레일의 측면마모와 같은 경우는 발생을 방지하는 것이 아니고 그 진행을 억제한다고 하는 쪽이 적당하다는 생각이 든다. 그런데, 레일 쉐링과 같은 피로 균열의 발생에 관하여도 실제로는 육안으로 확인할 수 없는 길이 수 μm 의 미소 균열(micro crack)이 무수하다고 할 정도로 레일 표면에 존재한다. 결국, '균열'의

발생이 무엇인지는 분명하지 않다. 본고에서는 레일 웨어링에 관하여 거치른 정의이지만 '균열'의 발생을 육안으로 확인할 수 있는 수 mm 정도의 크기까지 성장한 시점이라고 고려하기로 한다. 예방 연삭(삭정)의 '예방'에 관한 정의에 대해서는 상기와 같은 견해도 있지만, 이미 균열이 있어도(보여도) 레일 파단에 이르는 것을 방지하는 것이라는 견해도 있다.

정의를 어느 것으로 하여도, 레일 파단에 이르는 것을 방지하는 것은 물론이지만 유지보수로서는 어느 정도의 보안도를 확보하면서 그 재료의 사용 기간을 연장하도록 효율적인 보수작업을 하는 것이다. 이러한 의미로 레일 웨어링에 관하여 육안으로 확인할 수 있는 '균열'은 상당히 보안도가 낮게 되며, 그 후의 성장에 따라 이음매판의 부설로부터 조속한 레일 교환으로 비교적 빠른 시기에 대응하여야 한다.

본고에서는 이와 같은 관점에서 육안으로 확인할 수 있는 크기를 레일 웨어링의 '균열' 크기에 대한 하나의 목표로 하고 있다. 다만, '예방'의 레벨은 보안도를 포함한 보수의 고려 방법에 의존하고 있다.

이와 같은 배경을 근거로 하면, '마모'와 '예방'의 관계가 어떻게 될 것인가? 급곡선 외측레일의 게이지 코너에 보이는 레일 측면마모에는 '예방'이라고 하는 어구보다 진행을 억제한다고 하는 쪽이 익숙하지만, 실은 '균열'도 보수의 고려 방법에 기초하여 어느 크기에 도달하는 것을 '예방'하고 있다고 한다. 같은 모양으로 급곡선 안쪽레일에 형성되는 파상 마모도 연속하는 요철이 어느 크기에 도달하지 않게 방지하는 것을 '예방'이라고 말하지만, 이 경우의 크기는 '균열'의 경우에 대해 기술한 보수의 고려 방법에 의존하기는 하나 일반적으로는 레일에서 차륜 주행 표면의 광택에 의하여 파상의 요철을 눈으로 볼 수 있는 크기로 된다. 왜냐면, 눈으로 볼 수 있도록 되면, 그 성장이 빨라서 수개월에 상당한 크기로 되어 레일 연삭에 의한 평활화 등의 보수 작업을 검토할 필요가 생긴다. 이것은 레일 웨어링과 유사한 점이 있다.

이상으로 '손상'과 '예방'의 정의에 관하여 해설하였지

만 현재 문제로 되고 있는 대표적인 레일 손상인 레일 웨어링, 레일 용접부분의 휨 피로, 급곡선 안쪽레일의 파상 마모 및 급곡선 외측레일의 측면마모에 대하여 레일의 연삭과 윤활이라고 하는 2개의 예방 방법에 대하여 지금까지 밝혀진 지식과 실무의 현상을 소개한다.

3. 예방 연삭

3.1 레일 웨어링의 예방

손상 예방의 가장 전형적인 예가 레일 웨어링의 예방 연삭이다. 레일 웨어링은 레일의 유지보수에서 큰 문제이다. 이 손상은 차륜으로부터의 반복 전동 하중을 받아 생기는 피로 손상의 하나이며, 같은 모양의 손상으로서 오래 전에는 일반철도에서 '흑렬(黑裂)'이라고 부르는 큰 문제이었다. 그 후에 고속 선로에서 다시 문제로 되어 그 대책으로서 레일 표층의 피로 층을 연삭하여 제거하려는 시도가 행하여지기 시작하였다. 그 후, 몇 개의 연삭 방법에 관한 추적 조사 등으로부터 지금까지 얻어진 지식을 기초로 실내 시험기를 시험 제작하여 어느 때, 어느 정도 연삭하는 것이 가장 효과적인가를 실험적으로 구하였다.

여기서는 하중 조건과 연삭 주기를 통과 톤수(실험에서 하중의 반복 수에 축중 17톤을 곱한 값)로 설정하였다. 이 통과 톤수를 5천만 톤(반복 수 3×10^6 회에 상당)으로 일정하게 한 경우에 1 회의 삭정량과 웨어링이 발생하기까지의 누적 통과 톤수의 관계에서 예방 연삭의 효과를 실험적으로 구하였다. 여기에서, 예를 들어 연삭 주기를 통과 톤수 5천만 톤으로 한 경우에 약 0.1 mm의 연삭 깊이로 평균적(파괴 확률 50%)으로는 누적 통과 톤수가 8억 톤을 넘기까지 레일 웨어링의 발생을 억제할 수 있는 것으로 된다.

차륜/레일 접촉면의 표면 거칠기를 고려한 응력 해석에 의하면, 이들의 실험 결과에서 극(極)표층은 응력이 커서 소성 변형하는 점, 또한 결정학(結晶學)적인 어프로치로부터 적어도 고속 선로의 조건에서는 응력 해석과 같은 모양으로 극표층의 특정한 미끄러짐 면의 방향이 가지런한

(소성 변형에 대응하는) 점이 분명하게 되는 등, 이론적으로도 극표층의 사용상(使用傷, damage)이 커서 그 부분을 연삭하는 일의 타당성이 분명하게 되고 있다.

표면 거칠기를 고려한 소성 변형의 목표로 되는 본 미세스(Von Mises) 응력(相當 應力)을 나타낸 그림의 등응력선(等應力線) 밀도로부터 표면에서 수십 μm 범위의 응력이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이 예방 연삭에 관하여는 외국 고속선로의 조사 구간에서 레일 연삭차 2 편성에 의하여 1년(평균 통과 톤수 4천만 톤) 동안 전선(全線)을 약 0.08 mm 연삭하는 체제로 정비하고부터 레일 웨어링이 급격하게 감소하고 있다는 보고가 있어 예방 연삭이 효과적이라는 점이 검증되고 있다.

3.2 레일 용접부 피로의 예방

다음으로, 레일 용접부분 휨 피로의 예방에 대하여 레일 연삭의 효과를 소개한다.

레일 웨어링의 예방 연삭은 전동 접촉에 의한 피로 층을 직접 제거하기 때문에 효과를 직접적으로 반영하기 쉬운 것이지만, 레일 용접부분의 연삭은 레일의 차륜 주행표면을 평활화하여 주행 차량의 윤중 변동을 억제하는 것이 목적이다. 다만, 그 연삭 효과 산정의 기본으로 되는 차량 주행 하중에 의한 누적 피로 피해의 산정에 있어서는 하중의 반복 수에 대한 피로 피해를 선형으로 누적하는 수정 마이너 법칙(修正 Miner 法則)을 이용하고 있지만, 실제의 레일 휨 응력 범위가 수정 마이너 법칙의 그다지 정도가 좋지 않은 범위에 있기 때문에 결과적으로 피로수명 산정치의 신뢰성이 낮게 되어 있다. 다만, 현 시점에서는 수정 마이너 법칙에 대신할 적당한 산정식이 없는 것이 현상이다.

한편, 레일 용접부분에 발생하는 요철을 레일 연삭으로 평활화함에 따라 레일 용접부분이 받는 주행 차륜으로부터의 동적 하중의 저감 효과에 관하여는 차량/궤도 동적 응답 모델을 이용하여 상당히 좋은 정밀도로 예측이 가능하다.

그래서, 엔크로드드 아크 용접부분의 형상을 가정하여 이음매 처짐과 용접 개소의 요철을 각각 사인 파형으로 조합한 단파장의 궤도 틀림이 있는 자갈 궤도를 상정하여 고속 차량이 이 자갈 궤도를 270 km/h로 주행하는 경우 60 kg/m 레일 용접부분의 피로 수명을 요철의 진행을 고려하면서 산정한 결과에서 연삭 주기를 일정하게 한 경우의 연삭 깊이의 피로 수명에 주는 영향을 이해할 수 있다.

4. 윤활

4.1 차륜 플랜지와 게이지 코너의 마모

차륜은 차륜과 레일간의 마찰력을 이용하여 주행하므로 쌍방에 필연적으로 마모가 생긴다. 특히, 급곡선에서 외측 레일의 게이지 코너에는 차륜 플랜지와 레일간에 큰 마찰력이 생기기 때문에 이 접촉부가 크게 마모한다. 이들의 마모가 차량이나 궤도의 보수비를 증대시키는 요인으로 되고 있으므로 마모 현상을 조사하고 마모를 줄이는 공리가 필요하게 된다.

한편, 차륜과 레일의 마모에 영향을 주는 인자로는 ① 차륜과 레일의 재질 및 그 조합, ② 담면 형상을 포함한 차량의 조건, ③ 기름칠(塗油)이나 모래살포(撒砂)를 포함한 궤도의 조건, ④ 기상과 환경 조건 등이 열거된다. 실제의 마모는 이들 여러 인자의 영향을 단독으로 받는 것이 아니며, 또한 각각의 영업 선로에 따라 영향의 인자도 다르기

표 1. 마모의 분류

| 마모의 형태 | 마모의 메커니즘 |
|-----------------|------------------------------|
| 의착(疑着) 마모 | 진실의 접촉 부분에서 의착 결합에 의한 파괴 |
| 마멸(abrasive) 마모 | 단단한 먼 돌기, 혹은 경질 입자의 절삭 작용 |
| 부식 마모 | 분위기나 윤활제의 부식 작용 |
| 피로 마모 | 접촉부에서 반복 응력에 따른 표면 근방의 피로 파괴 |

때문에 마모의 발생 상황도 복잡하다. 즉, 각각 인자의 차이에 따라 마모의 형태나 마모의 메커니즘이 다르다. 마모의 형태는 일반적으로 표 1과 같이 4개로 분류되고 있다. 그 중에서 의착(疑着) 마모가 주제이다. 이 의착 마모 진전의 지표로 되는 마모율은 접촉면 압력(= 법선력(法線力) / 접촉 면적)에다 미끄러짐 율과 재료 계수를 곱하여 다음의 식으로 나타낸다.

$$\text{마모율} = \text{접촉면 압력} \times \text{미끄러짐 율} \times \text{재료 계수}$$

여기서, 접촉면 압력과 미끄러짐 율은 차륜이나 레일의 형상 등 차량과 궤도의 조건에 관계한다. 한편, 재료 계수는 차륜·레일간의 윤활 상태 등으로 결정하는 마찰 계수나 재질의 경도 등에 관계한다.

4.2 파상 마모의 예방

지하철에서 많이 보여지는 곡선반경이 작은 급곡선에서 파상 50~150 mm의 파상 마모가 발생하여 큰 문제로 되고 있다. 파상 마모로서는 직선, 급곡선 외측레일 및 급곡선 안쪽레일에 발생하는 몇 개의 유형이 있지만, 특히 급곡선 안쪽레일에 발생하는 유형이 많이 보고되고 있다.

파상 마모의 원인(발생 메커니즘)에 대하여는 그 유형에 따라 다르지만, 가장 많이 보고되어 문제로 되고 있는 급곡선 안쪽레일에 발생하는 유형을 그림 1과 같이 고려하고 있다.

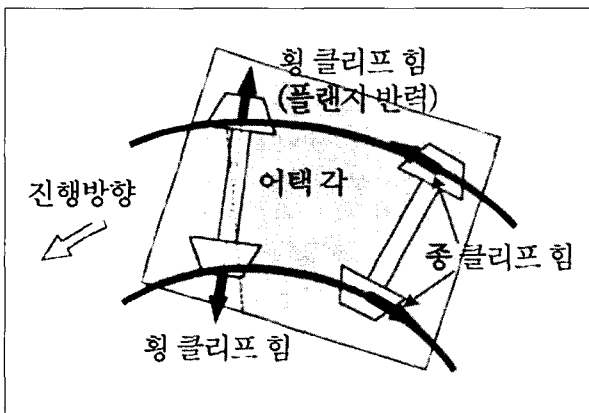


그림 1. 대차의 곡선 통과시 차륜에서 레일에 작용하는 힘

먼저, 차량이 곡선을 통과할 때에 차륜에서 레일에 작용하는 힘(그림 1)을 고려하자. 대차 전축(前軸)의 안쪽레일 쪽 차륜/레일간에는 조타 부족으로 발생하는 어택 각(attack 角)에 기인하는 큰 횡압(레일 두부상면과 차륜 답면의 크리프 힘인 것에서 '횡(橫) 크리프 힘' 이라고 부른다)이 발생한다. 대차 전축은 외측레일 쪽의 차륜 플랜지와 레일 게이지 코너(궤간 안쪽의 두부 측면)의 접촉까지 가능한 한, 윤축의 좌우 변위를 취하는 것에 비하여, 대차 후축(後軸)은 대차 및 윤축의 밸런스 하에서 통상적으로 외측레일 쪽의 차륜 플랜지가 레일에 접촉하는 것이 아니고 차륜 직경 차이 부족으로부터 후축에는 큰 종(縱) 크리프 힘이 발생한다. 한편, 차륜이 레일 이음매를 통과할 때에 윤중이 변동하여 윤중×동(動)마찰계수로 나타내는 한계 마찰력과 전축의 안쪽레일 쪽 차륜/레일간에 작용하는 횡 크리프 힘, 또는 그것과 종 크리프 힘의 합력과 동적인 대소 관계에 따라 스틱 슬립(stick slip), 또는 롤 슬립(roll slip)이라 부르는 레일의 좌우, 또는 반복 진동과의 관계가 강한 마찰 진동이 발생하여 레일 두부 상면에 파상으로 요철이 형성된다고 이해하고 있다.

이와 같은 발생 메커니즘에서 급곡선 안쪽레일의 파상 마모 예방방법으로서 횡 크리프 힘을 억제하여 레일의 좌우 진동, 혹은 변칙경사 진동을 여기(勵起)시키지 않도록 안쪽레일 두부상면에 윤활제를 칠하는 것이 고려된다. 이 안쪽레일 두부상면의 윤활에 의한 횡압·윤중 비에 대한 영향을 살펴보면, 윤활을 하지 않은 경우에 전축(前軸) 안쪽레일 쪽의 횡압·윤중 비(Q/P)가 후축(後軸)의 것보다 상당히 큰 점, 또한 윤활에 의하여 전축의 것이 현저히 작은 점이 분명하다. 그래서 그 효과에 의거하여 급곡선의 구동(驅動, 力行) 구간에서 윤활제를 안쪽레일 두부상면에 칠한 시험을 한 결과, 통과 톤수에 대하여 약 2억 톤, 차량의 통과 축수(軸數)에 대하여 약 2.3×10^7 축(軸)까지 계속하여 파상 마모가 발생하지 않음이 확인되었다.

다만, 이 예방 방법은 안쪽레일 두부상면에 윤활제를 도포하기 때문에 특히 차륜의 활주에 주의할 필요가 있다. 그 때문에 통상의 주행 상태에서 미끄러짐 율이 비교적 작

은 경우에는 차륜과 레일간에 작용하는 점착력을 작게, 제동 상태에서 미끄러짐율이 비교적 큰 경우에는 그 점착력을 크게 하는 윤활제가 필요하게 된다. 현재 외국에서 개발을 진행하고 있는 윤활제의 시험 결과를 보면, 표면 거칠기 r.m.s = 1.2 μ m, 속도 40km/h, 접촉 압력 730MPa 에서 미끄러짐율(0~15%)에 따른 접선력(接線力) 계수는 물이 0.23~0.21, 시작(試作) 윤활제가 0.14~0.16, 그리스 가 0.10~0.07 이다. 이 윤활제의 개발 개념은 미끄러짐율이 작은 영역에서 통상의 윤활유 정도의 점착력으로 억제하고, 제동 시 등 미끄러짐율이 큰 영역에서 강우 시 이상의 점착력을 얻는 것으로 하고 있다.

4.3 레일 측면마모의 예방

(1) 어택 각, 횡압의 영향

급곡선 외측레일의 측면마모에 관하여 궤도의 곡선반경을 파라미터로 하여 마모량과 누적 통과 톤수 등에 대하여 정리한 조사 결과는 많이 보고되어 있지만, 마모량에 영향을 주는 인자의 정량적인 분석 결과는 그다지 없다. 또한, 예방 대책으로서는 열 처리하여 경도를 크게 한 레일의 채용이나 외측레일 게이지 코너의 기름칠이 일반적이다.

이와 같은 상황에서 마모에 영향을 주는 접촉 압력과 미끄러짐율, 또는 미끄러짐 속도를 횡압과 어택 각이라는 거시적이고 역학적인 인자로 포착하여 레일 측면마모에의 영향도를 평가한 실내 시험에 의하면, 횡압과 어택 각이 클수록 레일 측면마모에 대한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 정량적인 관계를 이용하여 효율적인 보수 방법을 검토하는 것이 극히 중요하다.

(2) 외측레일 게이지 코너의 윤활

차량 주행 시험에서 얻어진 횡압에 대한 외측레일 게이지 코너 윤활의 영향을 보면, 횡압이 약 3/2 배이다. 한편, 윤활에 의한 동(動)마찰계수는 건조 시의 0.6에서 0.1로 되어 약 1/6으로 감소한다. 더욱이, 이 측정 시험에서 어택 각은 거의 변화가 없었으므로 어택 각의 보정이 없는 것으

로 하고 마찰계수와 횡압의 영향만을 가정하면, 레일 측면 마모는 윤활이 없는 경우에 비하여 1/6(마찰계수의 영향) \times 3/2(횡압의 영향) = 1/4로 감소한다고 예측된다.

(3) 안쪽레일 두부상면의 윤활

안쪽레일 두부상면의 윤활은 파상 마모의 예방에 효과적이지만, 안쪽레일의 횡압과 함께 외측레일의 횡압도 감소시키므로 그 횡압의 감소에 의하여 외측레일의 측면마모도 예방할 가능성이 있는 점이 분명하다. 더욱이, 이 측정 시험에서도 어택 각은 그다지 변화가 없었으므로 어택 각의 보정이 없는 것으로 하면, 외측레일 게이지 코너의 윤활과 다르게 차륜 플랜지와 레일 게이지 코너의 마찰계수도 변하지 않으므로 안쪽레일 두부상면의 윤활에 의한 외측레일 측면마모의 예방 효과는 상기와 같은 횡압의 저감 효과와 같다고 생각된다. 지하철에서 삐걱거리는 소리를 억제하기 위하여 안쪽레일 두부상면을 도유할 경우에 결과적으로 외측레일 측면마모도 억제되는 것이 보고되어 있다. 다만, 이 측면마모 진행을 정밀도가 좋게 예측하기 위해서는 측면마모가 진행함에 따른 마모 형상에 응한 횡압과 어택 각의 변화도 고려할 필요가 있다.

5. 맺음말

이상으로, 레일의 손상을 예방한다고 하는 주제를 선정하여 연삭과 윤활에 의한 방법을 소개하였다. 피로 손상 등을 예방하기 위한 연삭은 효과적인 연삭 주기와 연삭 깊이의 밸런스가 문제이다. 한편, 마모를 예방하는 윤활은 마모를 지나치게 예방(억제)하면 피로 손상이 발생하는 등 마모와 피로의 밸런스를 고려하여 과도한 예방 효과를 끝까지 보고 확인하여야 한다. 이 마모와 피로의 상호관계는 심오한 문제이지만, 착실하게 정량적인 분석을 진행하여 보다 좋은 해법을 구하여 가는 것이 중요하다.