한국철도학회 철도저널 16권 1호, 2013년 2월, pp. 27-38 ■

차륜과 레일 간의 접촉문제에 관한 최근의 화제

서 사 범
㈜서현기술단 부사장
공학박사/철도기술사
T.010.6219.1369
suh7484@hanmail.net

Ⅰ. 머리말

차륜과 레일을 기본으로 하는 철도시스템에서 차륜과 레일 간의 접촉문제는 미해명의 점이 남아있는 이른바 철도고유문제의 하나이다.

철도가 우리나라에 처음으로 도입되었을 때는 차륜과 레일이 이미 철제이었다. 레일은 차륜이 땅속으로 박히는 것을 방지하기 위하여 지면에 판이나 석재를 깔았던 부설물이 기원이라고 한다. 즉, 레일이란 차량의 하중을 지지하고 차륜을 원활하게 회전시키는 역할을 기본으로 하고 있다. 그 후에 차륜의 진로를 안내하기 위하여 플랜지가 붙은 레일이 이용되었던 시대를 거쳐 18세기 후반에 플랜지가 차륜 측으로 옮겨져 현재의 차륜과 레일의 원형이 생겼다. 당시는 말(馬)과 사람이 동력원이었기 때문에 차륜과 레일 간에서 구동력의 전달은 불필요하였지만 19 세기에 들어 증기기관차가 등장하게 됨에 따라 차륜과 레일의 접촉부는 차륜의 회전력을 레일에 전하는 중요한 역할을 담당하게 되었다. 이른바 점착철도의 시작이다. 더욱이, 도전(導電)성을 가진 차륜과 레일을 이용한 신호시스템(궤도회로)이 19세기 후반에 발명됨에 따라 차륜과 레일의 접촉부에 전기접점으로서의 역할도 부과되었으며 현재는 전기철도에 불가결한 귀선전류(전철화구간에서 전차로부터 변전소로 되돌아가는 전류)도 차륜과 레일의 접촉부를 경유하고 있다.

철도차량이 레일 위에서 전진하여갈 때에 통상적으로 차륜은 레일 위를 굴러가면서 주행한다. 그렇다면, 차륜 스스로 가속하면서 전진할 때에 차륜의 회전수와 그 회전반경으로부터 계산할 수 있는 차륜의 주행거리와 실제로 차륜이 레일 위를 진행하는 거리는 일치할 것인가? 답은 '아니다' 이며, 차륜이 회전하는 거리는 실제로 레일 위를 진행하는 거리보다도 길게 되어 있다. 즉, 차륜은 레일 위를 미끄러지면서 굴러서 주행하고 있는 것으로 된다. 다만, 여기서의 '미끄럼' 은 차륜이 레일 위를 굴러갈 때에 그와 같은 미끄럼이 발생되고 있다고는 볼 수 없을 만큼 작은 것이다.

본고에서는 전동접촉 등을 비롯한 차륜과 레일 간의 접촉문제에 관한 최근의 화제에 관하여 소개한다.

Ⅱ. 차륜과 레일 간의 접촉문제

1. 차륜/레일 접촉의 개관

차륜이 레일 위에서 굴러갈 때에 각각의 상하방향, 전후

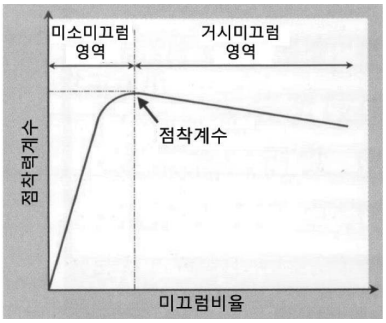

그림 1. 일반적인 차륜/레일 간의 점착력 특성

방향 및 좌우방향의 탄성변형(소형변형도 생기는 경우가 있다)으로 전달력이 생긴다. 철도에서는 이러한 상하방향의 전달력을 '윤하중', 전후방향을 '종(縱)크리프 힘', 좌우방향을 '횡(橫)크리프 힘' 이라고 부른다. 또한, '크리프 힘'의 것을 '점착력' {마찰학(tribology)의 분야에서는 일반적으로 '접선(接線)력' 또는 '트랙션(traction)' }이라고도 부른다.

크리프 힘에 관하여는 제Ⅲ장에서 상술하지만, 이들의 전달력 중에 특히 종 크리프 힘은 구동력이나 제동력에 관하여 중요한 전달력으로서 일반적으로 그림 1과 같은 특성을 나타내며, 이것을 '크리프 힘 특성' 또는 '점착력 특성' 이라고 부른다. 그림에서 세로축은 접선력과 수직하중인 윤하중과의 비(比)인 '접선력계수' 또는 '트랙션계수', 가로축은 차륜의 주(周)속도와 차륜의 이동속도(레일에 대한 차량의 속도)의 차이에 대한 그들의 평균속도와의 비인 '미끄럼 비율' 이 일반적으로 이용된다. 또한, 이 접선력/윤하중 비의 최대치를 '점착계수' (마찰학의 분야에서는 '최대트랙션계수')라고 부르며, 차량의 가속 또는 감속의 성능, 올라탐 탈선 등의 현상을 해명하는 데에 중요하다. 더욱이, 이 점착계수를 주는 미끄럼 비율보다 작은 미끄럼 비율의 영역을 '미소 미끄럼 영역' 또는 '크리프 영역', 그보다 큰 영역을 '거시 미끄럼 영역' 이라고 부른다.

또한, 이와 같은 차륜/레일 간의 전달력에 의하여 발생되는 응력 또는 그 응력으로 생기는 소성변형을 이해하는 것은 곡선구간 외측레일 게이지코너부분의 마모(이하에서는 '측(側)마모' 라고 한다), 차륜플랜지 직립(直立)마모, 레일두부상면의 쉐링(shelling)으로 대표되는 전동접촉피로 등을 검토하기 위하여 중요하다.

2. 마찰 · 점착

차량의 주행특성으로서 중요한 마찰과 점착에 관하여 반경이 작은 곡선(일반적으로 '급곡선' 으로 부르는 일이 많다)에서 저속주행 시의 올라탐 탈선과 습윤 상태에서 고속주행 시의 점착계수 저하에 따른 활주 · 공전이 중요한 문제이다.

(1) 크리프 특성

이 절에서는 올라탐 탈선에 관하여 급곡선 주행 시의 크리프특성과 점착계수(저속 시에는 '동마찰계수' 와 거의 같다고 생각된다)를 이같다고 생각된다)를 이해하도록 차륜과 레일 간의 윤활효과에 착안한 차량주행 시뮬레이션 결과를 소개한다. 더욱이, 시뮬레이션결과는 주행시험으로 타당성이 확인되고 있다.

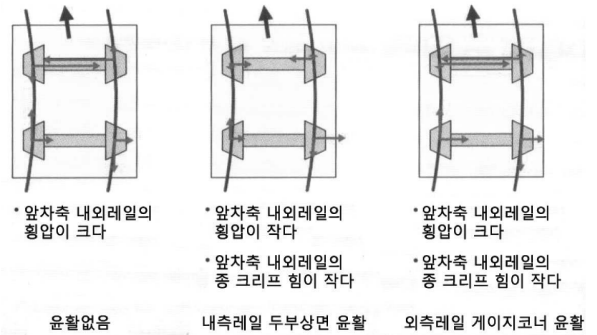

그림 2. 각 습윤 조건하에서 곡선주행 시에 생기는 크리프 힘 (일부 플랜지반력 포함)

무(無)윤활, 차륜답면과 곡선내측레일 두부상면의 윤활 및 차륜플랜지와 곡선외측레일 게이지코너 간의 윤활 시에 대차 앞뒤 차축의 좌우차륜과 레일 간에 작용하는 종과 횡 크리프 힘 등을 그림 2에 나타낸다. 그림에서 내측레일 쪽의 차륜답면/레일두부상면을 윤활하여 마찰계수를 저감시키는 것이 내측레일뿐만 아니라 외측레일 쪽의 차륜/레일 간에 발생되는 횡압(앞 차축 외측레일 쪽에서 차륜플랜지와 레일 게이지코너가 접촉하는 경우는 그 접촉부에 생기는 플랜지 반력이라고 불리는 작용력과 횡 크리프 힘과의 횡방향 합력)을 대폭으로 저감시키는 것을 이해할 수 있다. 또한, 외측레일 쪽의 차륜플랜지/레일 게이지코너 간의 윤활은 무(無)윤활 시보다 특히 외측레일 쪽의 횡압이 증가된다고 하는 흥미 깊은 결과가 얻어졌다. 이것은 외측레일 쪽의 차륜플랜지와 레일 게이지코너 간에 발생되는 종 크리프 힘이 감소되어 조타되기 어렵게 되어 어택 각(윤축과 곡선 반경방향이 형성하는 각도 : 조타성의 기준으로 되는 각도)이 증가되어 횡압이 증가된 것이라고 생각된다.

이상과 같이 내측레일 쪽의 차륜답면/레일두부상면 간의 윤활은 내측레일 쪽과 외측레일 쪽 쌍방의 횡압을 대폭으로 저감시키는 효과가 있는 점에서 후술하는 급곡선 내측레일

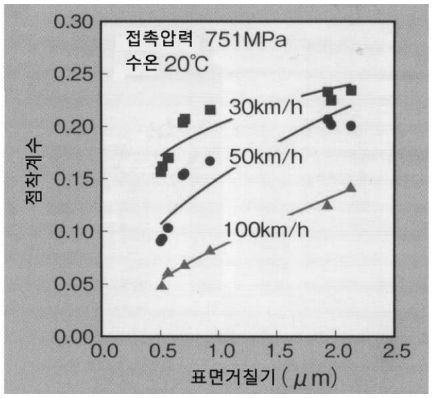

그림 3. 표면 거칠기가 점착계수에 주는 영향

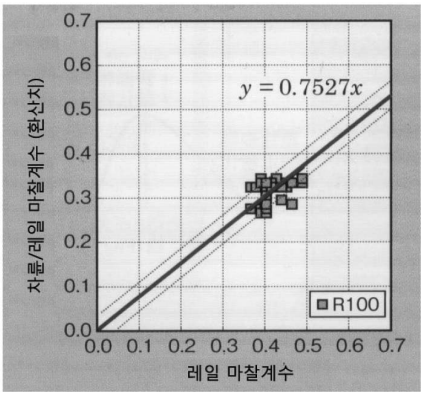

그림 4. 레일마찰계수(마찰계)와 차륜/레일간 마찰계수의 관계

파상마모를 억제하기 위하여 또는 내측레일 쪽의 마찰소음(squeal noise)을 억제하기 위하여 이 내측레일 윤활을 응용 발전시킨 차륜/레일 마찰완화기법이 개발되고 있다.

(2) **점착계수**

고속주행이나 활주 · 공전에 관하여 습윤 상태에서의 점착계수에 대한 표면 거칠기나 수온 등의 영향 등은 2원통 회전접촉 시험기를 이용한 시험과 탄성유체윤활(Elasto-Hydrodynamic Lubrication) 이론에 기초한 해석으로 밝혀져 왔다. 그림 3에는 표면 거칠기가 점착계수에 주는 효과를 나타낸다. 습윤 상태에서 주행속도가 클수록 차륜/레일 간의 수막이 두껍게 되어 점착계수가 저하되고 표면 거칠기가 클수록 수막두께에 대한 표면 거칠기 돌기부의 고체접촉부분이 증가하여 점착계수가 상승한다. 또한, 표면 거칠기가 같은 경우에 수온이 높을수록 물의 점도가 작기 때문에 차륜/레일 간의 수막이 얇게 되어 표면 거칠기 돌기부의 고체접촉부분이 증가하여 점착계수가 상승한다고 생각된다. 따라서 특히 고속주행 시에 수온이 낮은 경우에 점착계수의 저하를 억제하기 위해서는 차륜/레일 간의 표면 거칠기를 적당한 크기 이상으로 확보하는 것이 유효하다. 이와 관련하여 차륜답면의 표면 거칠기를 개선하는 방법으로서 점착증가 연마자가 개발되어 있다. 또한, 활주 · 공전을 억제하기 위하여 차륜과 레일 간에 세라믹스(알루미나) 입자를 분사하는 장치(일명, 세라제트)가 개발되어 있다.

(3) **마찰계수**

한편, 차륜/레일 간의 동마찰계수(이하에서는 '마찰계수' 라고 칭한다)는 지하철의 올라탐 탈선을 계기로 그 사고원인의 하나로서 열거되었기 때문에 여러 가지의 상황에서 레일 마찰계수의 실태조사가 이루어졌다. 마찰계수는 측정기의 특성에 의존하므로 이 조사에서는 레일 마찰계(tribometer)를 이용하였다. 그리고 마찰계로 측정된 마찰계수와 실제 차륜/레일 간의 마찰계수 관계가 구하여졌다. 이 관계를 그림 4에 나타낸다. 그림에서 대략적으로는 마찰계에 의한 마찰계수의 약 0.8배가 차륜/레일 간의 마찰계수에 상당한다고 하는 결과가 얻어졌다.

그림 5에 전차와 기동차의 분위기(기름환경) 차이와 단위시간 당의 통과차축수를 50축 이상과 미만으로 착안하여 마찰계로 측정한 마찰계수를 나타낸다. 그림에서 비전

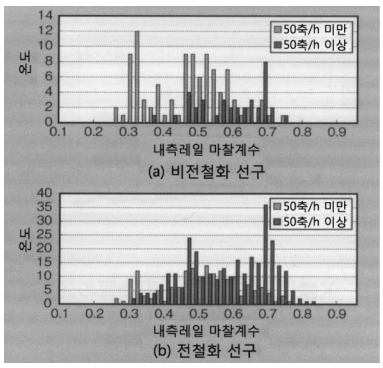

그림 5. 레일마찰계수(마찰계)의 통과차축수별 빈도분포

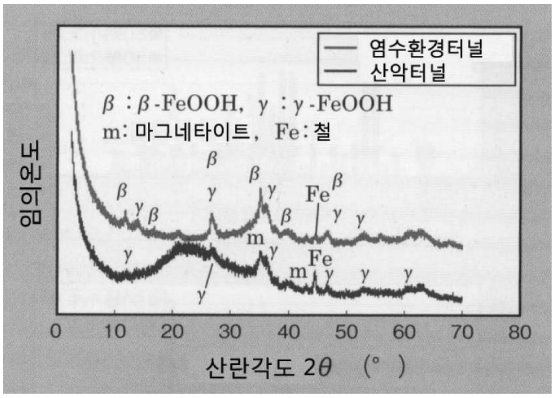

그림 6. X선에 의한 레일표면 물질의 분석결과

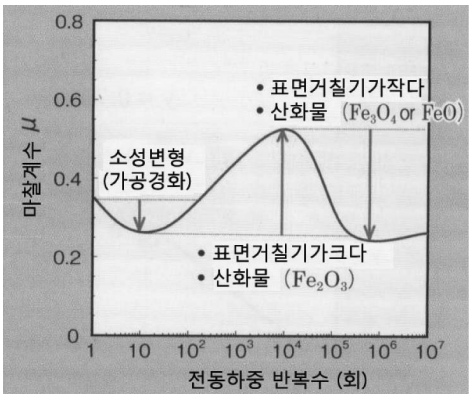

그림 7. 전삭 후의 전동하중 반복수와 마찰계수의 관계(실내시험)

철화 선구와 전철화 선구에서는 전체로서 전철화 선구 쪽의 마찰계수가 크고, 단위시간당의 통과차축수가 50축 이상인 쪽이 50축 미만보다 큰 것을 이해할 수 있다. 즉, 기동차 주행의 비전철화 선구가 전차 주행의 전철화 선구보다 레일 주위가 보다 기름환경으로 되기 때문이라고 생각된다. 그렇지만 어쨌든 마찰계수의 각종 영향인자로서 열거되고 있는 파라미터는 기상조건, 운전조건이나 환경조건이며, 접촉면의 산화막이나 산화물 등의 표면성상을 직접 반영하는 것은 아니다.

그러므로 염수(鹽水)환경 터널에서 발생되고 있는 레일 파상마모의 발생메커니즘에 관하여 레일의 표면산화물을 분석하여 마찰계수를 평가한 사례를 소개한다. 여기서 대상으로 하는 파상마모는 차륜의 용접이음매 통과 시에 여기(勵起)된 스프링 하 질량의 궤도지지스프링 상의 고유진동에 의한 윤하중변동에 따른 차륜의 롤 슬립(roll slip)이라 불리는 종 미끄럼(거시 미끄럼을 일으키지 않는 정도)의 변동으로 발생된다고 생각된다. 한편, 동일한 구배를 갖고 차륜/레일 간에 동일한 종 크리프 힘이 작용함에도 불구하고 파상마모가 발생되지 않고 있는 산악터널이 있다. 그래서 파상마모의 원인이라고 생각되는 롤 슬립은 산악터널에서는 생성되지 않는 염수환경 하에서 레일표면에 생성되는 산화물에 의한 마찰계수의 저하가 원인이 아닌가라고 생각되었기 때문에 쌍방의 레일표면에서 채취된 피막(皮膜)물을 X선으로 분석하였다. 그 분석결과를 그림 6에 나타낸다. 산악터널의 레일에서는 검출되지 않았던, 특히 수분이 있는 경우에 마찰계수가 저하되는 β-수산화철(FeOOH)이 염수환경 터널에서만 검출되었다. 또한, 레일표면의 산화정도도 염수환경 터널이 산악터널보다도 상당히 심하고 마모진행도 크다고 생각되어 β-수산화철(FeOOH)의 검출은 상기의 파상마모 발생메커니즘을 검증하는 유력한 실마리라고 생각된다.

다음에 전삭(轉削) 직후 또는 전삭 후 어느 정도 주행한 후 등, 전삭에 관계된다고 생각되는 올라탐 탈선에 어떠한 영향을 주고 있는가를 밝히는 것은 중요한 과제이다. 그러므로 올라탐의 추진력으로 되는 내측레일 쪽의 횡 크리프 힘에 직접 관계되는 마찰계수와 전삭 후의 차륜답면 표면성상에 관하여 차륜과 레일에서 잘라낸 시험편으로 수행한 실내시험을 소개한다. 실내시험으로 얻어진 전삭 후 전동하중의 반복수와 마찰계수의 관계를 그림 7에 나타낸다. 그림에서 전삭 직후는 표면산화물 등이 지워진 직후이기 때문에 마찰계수가 비교적 크고 그 후에 마찰계수가 저하된다. 이 마찰계수의 저하는 전동하중의 반복으로 레일표면이 가공 경화되기 때문이라고 생각된다. 그 후에 전동하중을 10^3~10^5회 받는 동안에 10^4회 부근을 피크로 마찰계수가 한 차례 상승하고 그 후에 저하한다. 이 시험결과는 전삭 직후가 아닌 수10 km 주행 후에도 마찰계수가 상승되어 탈선에 대한 여유도가 저하될 가능성을 나타내는 대단히 흥미가 깊은 것이다. 이 마찰계수의 변화는 표면산화물의 존재비율에 착안하면 전동하중의 반복수 10^3~10^5회에서는 마찰계수가 비교적 큰 헤머타이트(hematite, Fe_2O_3)의 비

율이 증가되고 그 후에 마찰계수가 비교적 작은 마그네타이트(magnetite, Fe_2O_4)의 비율이 증가되는 경향과 일치된다. 이것은 표면 상태를 직접 검지할 수 있으면 마찰계수를 평가하기 위하여 극히 유효함을 나타내고 있다.

따라서 당장 용이하지는 않지만 염수환경 터널 내의 레일이나 전삭 후의 차륜 마찰계수를 평가하기 위하여 수행된 분석을 현지 또는 있는 모습으로 표면산화물 등의 조사 · 분석을 가능하게 하는 것은 전동접촉에 따른 전달력을 보다 깊게 이해하기 위하여 중요하다고 생각된다.

3. 마모와 피로

여기서는 전동접촉으로 재료가 마모 또는 피로하여 생기는 주된 손상과 그 대책에 대하여 소개한다.

(1) 레일 측(側)마모

급곡선 외측레일에 생기는 측마모에 관하여는 이것을 억제하기 위하여 열처리로 경화시킨 레일의 채용이나 외측레일 게이지코너와 차륜플랜지 간에 도유 등을 하여 왔다. 이 외측레일 게이지코너부분에서의 윤활효과에 대하여는 그림 2에서 대차 앞 차축의 외측레일 쪽 차륜/레일 간의 종 크리프 힘(마모를 촉진하는 마찰력)이 무윤활 시보다 대폭으로 작게 되어있는 것을 용이하게 이해할 수 있다. 또한, 내측레일 두부상면과 차륜 답면 간의 윤활은 대차 앞 차축의 내외레일 쌍방의 횡압이 대폭으로 감소되기 때문에 외측레일 마모에서도 대폭적인 감소를 기대할 수 있다.

그러므로 외측레일 쪽 마모진행은 일반적으로 마찰계수, 접촉하중, 미끄럼속도 등에 비례한다고 생각되지만 차량과 궤도의 상호작용에 관한 파라미터인 횡압과 어택각에 착안하여 수행된 실내 마모시험의 결과를 소개한다. 시험결과를 그림 8에 나타낸다. 접촉하중인 횡압의 영향과 함께 미끄럼속도 또는 미끄럼비율 등에 관계되는 어택각의 영향도 현저한 것을 이해할 수 있다. 즉, 종 크리프 힘은 횡압과 마찰계수 쌍방에 관계되는 파라미터이다.

(2) 파상마모

주된 파상마모로서는 급곡선 내측레일, 곡선 외측레일과 직선에서 발생되는 비교적 짧은 파장과 긴 파장의 2 형태의 계 4형태가 있다. 특히, 도시철도 등의 급곡선 내측레일 두부상면에 파장 50~150 mm의 파상마모가 발생되어 소음 · 진동 등의 큰 문제로 되어 있다. 이 곡선 내측레일에서 발생되는 파상마모의 원인에 대하여는 대차 앞 차축의 내측레일 쪽 차륜/레일 간에는 안내력 부족으로 발생되는 어택각에 기인하는 큰 횡 크리프 힘과 차륜이 레일이음매 등을 통과할 때에 여기되는 차륜과 레일 간의 상하방향 윤하중변동으로 레일 좌우 또는 변칙경사 진동과 연성(連成)된 롤 슬립이라고 불리는 마찰진동이 여기되어 요철이 파상으로 형성된다고 생각되고 있다.

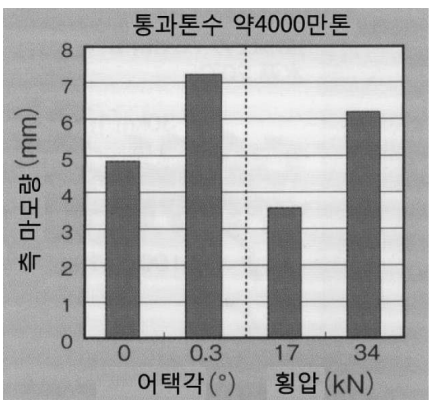

그림 8. 외측레일 측마모에 대한 어택각과 횡압의 영향(실내시험)

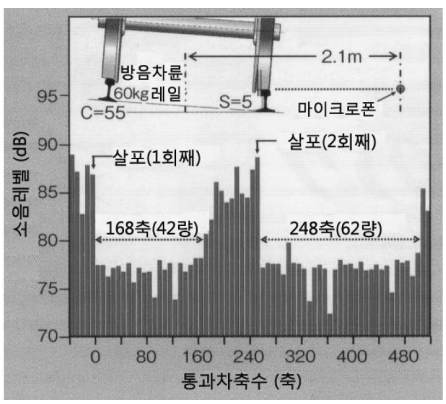

그림 9. 차륜/레일 마찰완화기법에 따른 마찰소음 저감효과

이와 같은 메커니즘으로부터 횡 크리프 힘(횡압)을 억제하여 레일의 좌우 또는 변칙경사 진동을 여기시키지 않게 하기 위하여 내측레일 두부상면의 윤활이 고려된다. 이 내측레일 두부상면과 차륜답면 간의 윤활효과는 그림 2에 나타낸 것처럼 대차 앞 차축의 내외레일 쌍방의 횡 크리프 힘을 대폭으로 감소시킨다. 다만, 차륜답면과 내측레일 두부상면 간의 윤활에 관하여는 차륜의 활주 · 공전에 주의할 필요가 있다. 그 때문에 통상의 주행상태에서 미끄럼비율이 비교적 작은 경우는 크리프 힘을 작게, 제동상태에서 미끄럼비율이 큰 경우에도 그 크리프 힘을 유지하든지 또는 상승시켜 그림 1에 나타낸 거시 미끄럼 상태로 즉시 이행되지 않는 윤활기법이 주목되고 있다. 이와 같은 윤활기법으로서 예를 들어 차륜/레일 마찰완화기법이 개발되었다. 이 기법으로 횡압을 저감시켜 파상마모의 발생을 억제함과 함께 그 횡압이 원인으로 되는 마찰소음(squeal noise)의 저감을 기대할 수 있다. 그림 9에 마찰소음(근방 음)의 저감효과를 나타낸다.

(3) 전동접촉 피로

차륜으로부터 반복하여 전동하중을 받아서 생기는 피로손상의 하나인 쉐링의 발생으로 다대한 보수경비를 요하고 있다. 쉐링 손상은 예전에 일반선로에서 흑렬(黑裂)로 불려왔고, 고속선로에서 그 대책으로서 레일피로 층의 연삭으로 제거하는 시도 등이 이루어져 왔다. 이와 같은 연삭방법에 관한 추적조사 등에 의거하여 예방연삭의 쉐링 억제효과가 실험적으로 구하여져 왔다. 그에 따르면, 예를 들어 연삭주기를 통과톤수{열차하중에 따른 궤도에 대한 대미지(부담력)를 표현하는 파라미터 : 하중×통과차축 수}로서 0.5억 톤으로 한 경우에 약 0.1 mm의 깊이에서 평균적(파괴확률 50 %)으로는 약 8억 톤을 넘는 정도까지 쉐링의 발생을 억제할 수 있음을 나타내었다.

또한, 주로 직선에서 발생되는 이와 같은 쉐링과는 달리 차량이 곡선을 주행할 때의 엄한 접촉조건 하에서 외측레일 측마모와의 밸런스에서 발생되는 헤드체크(head checks)라고 불리는 전동 피로손상도 큰 문제로 되어 있다. 이 피로손상은 2000년에 영국 해트필드(Hatfield)의 곡선에서 발생된 레일의 피로절손을 원인으로 하는 탈선사고를 계기로 많이 착안하게 되었다. 이 헤드체크의 예방에 관하여는 마모와 피로의 밸런스에 착안하여 연삭을 포함한 적당한 마모량의 제어로 피로손상을 방지하는 것이 고려되었다. 그리고 헤드체크와 마모진행에 관한 현지조사가 이루어져 열처리레일(HH340)에서의 헤드체크는 통과톤수 1억 톤당 1~2 mm의 측마모 진행에서 발생되기 쉬운 경향이 있다고 하는 식견이 얻어지고 있다.

Ⅲ. 차륜과 레일 간의 크리프 힘

1. 개관

제Ⅱ장에서도 언급하였지만, 강(鋼)을 재료로 하는 차륜과 레일은 서로 접촉되어 있을 때에 각각 소성 변형되어 어떤 면(여기서는 이것을 '접촉면' 이라고 부른다)을 형성하

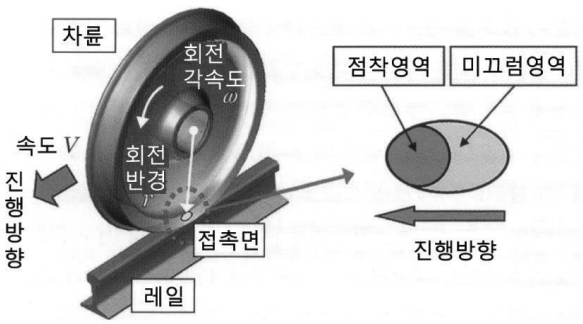

그림 10. 차륜답면에 접촉되어 있는 경우의 접촉면과 점착 · 미끄럼영역

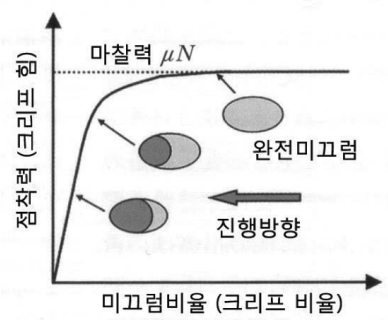

그림 11. 접촉면 내의 미끄럼과 크리프 힘의 관계

고 있다. 굴러가고 있는 차륜의 접촉면은 레일표면 위를 시시각각으로 이동하며 그 이동에 따라서 접촉면 내에는 차륜과 레일의 재료가 서로 둘러붙으면서 그 접촉면에 평행한 방향(진행방향 또는 전동방향)으로 탄성 변형된 형태로 있는 영역(점착영역)과 쌍방의 재료가 이미 둘러붙어 힘을 잃고 접촉하면서도 상대적으로 미끄러진 상태에 있는 영역(미끄럼 영역)이 생성된다(그림 10). 접촉면에 이와 같은 상태로 있는 미소한 전동미끄럼의 것을 크리프라고 하며, 이 미소 미끄럼에 따라 접촉면 내에 생기는 작용력을 크리프 힘이라고 부른다. 크리프 힘은 미끄럼비율, 또는 크리프비율이라고도 부르는 량 $\triangle V/V$로 그 특성을 특징지을 수가 있다(여기서 $\triangle V$는 차륜의 회전반경 γ과 회전각속도 ω로부터 얻어지는 속도 $\gamma\omega$와 차륜이 레일의 길이방향으로 진행하는 속도 와의 차이를 나타낸다). 미끄럼비율과 크리프 힘의 관계를 접촉면 내의 점착 · 미끄럼영역의 관계와 일치시켜 모식적으로 나타내면 그림 11과 같이 된다. 차륜과 레일의 접촉면 내에 작용하는 힘은 접선력이라고도 하며, 이 접선력 중에서 차륜과 레일 간의 미끄럼이 작은 것을 특히 크리프 힘이라고 부르고 있다. 접촉면 내의 미끄럼이 충분히 크게 되면 접선력은 어느 값으로 포화되고 그 때의 힘은 이른바 마찰력으로 된다{이것은 완전히 미끄러지고 있는 상태에 대해 의논하는 쿨롬(coulomb) 마찰력이다}. 이 마찰력과 접촉면에 수직으로 작용하는 힘, 즉 법선(法線)력 N과의 비는 마찰계수 m로 된다. 그 의미로 크리프 힘과 법선력과의 비는 어떤 미끄럼의 상태에서 마찰계수라고 생각할 수도 있으므로 그 비(比)를 등가(等價)마찰계수 또는 유효(실질적인) 마찰계수라고 부른다.

2. 차량의 운동과 크리프 힘

차륜과 레일 간에 작용하는 크리프 힘은 철도차량이 레일 위를 주행하다 멈출 때의 제동력이나 차량을 전진시키기 위한 구동력을 전달하는 역할을 하고 있다. 그 한편으로 차량의 불안정한 진동인 사(蛇)행동이나 진동승차감, 곡선통과성능, 차륜플랜지의 올라탐 탈선 등에 큰 영향을 미친다.

예로서 곡선을 통과하는 차륜에 작용하는 크리프 힘을 살펴보자. 내외 레일 각각의 크리프 힘은 그림 12(a) 중의 푸른 화살표와 같이 차륜에 작용한다. 여기서, 윤축의 운동을 파악하기 위하여 그림 12(c)와 같이 크리프 힘을 차량의 진행방향(레일길이방향)의 성분인 종 크리프 힘과 수직인 방향(침목방향)의 성분인 횡 크리프 힘으로 나누어 생각한다{또한, 그림에 있는 것처럼 접촉면 내의 법선축 주위의 회전미끄럼을 스핀(spin)이라고 부른다}. 종 방향으로는 비교적 큰 미끄럼이 생긴다. 여기서 종 크리프 힘 , T_{1x}, T_{2x}에 주목하면, 외측레일 쪽 또는 내측레일 쪽 차륜의 종 크리프 힘은 각각 진행방향 및 이와 반대방향으로 작용한다. 그리고 윤축에는 이들 내외 레일의 크리프 힘에 의

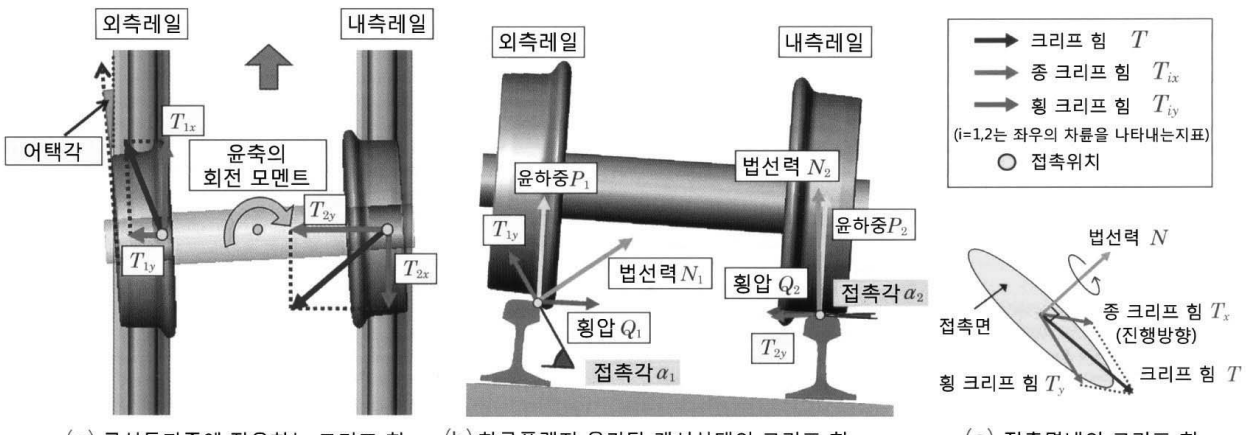

그림 12. 윤축에 작용하는 크리프 힘

하여 그림 12(a)에 나타낸 방향으로 선회모멘트가 작용하고 곡선을 잘 통과하는 것이 가능하게 된다. 따라서 종 크리프 힘은 윤축의 선회성능에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

다음에, 곡선을 통과 중인 차륜플랜지가 레일에 올라타려고 하는 때의 크리프 힘에 대하여 고찰하여보자. 이 경우에는 횡 크리프 힘이 큰 역할을 한다. 그림 12(b)에 차륜플랜지가 레일 올라탐을 개시하는 상태에서의 횡 크리프 힘 , T_{1y}, T_{2y} 를 나타낸다. 차륜플랜지 올라탐 개시상태에 있을 때에 윤축은 어택 각{레일에 대한 윤축의 선회각도이며, 윤축 요(yaw)각(角)이라고도 부른다}을 가진 상태로 주행하고 있다. 차륜답면부에 접촉되어 있는 내측레일 쪽의 횡 크리프 힘 T_{2y}는 그림과 같이 외측레일 쪽 차륜의 차륜플랜지를 레일 게이지코너로 밀어붙인다. 그 결과, 접촉면 내의 법선력 N_1이 증가되고 외측레일 쪽의 횡 크리프 힘 T_{1y}이 크게 된다. 또한, 그림에서 알 수 있는 것처럼 차륜플랜지부의 횡 크리프 힘 T_{1y}는 레일을 따라서 차륜이 올라타게 하는 방향으로 작용한다. 차륜과 레일 간의 마찰계수가 크게 되면 내측레일 쪽의 횡 크리프 힘이 함께 크게 되므로 탈선에 이를 가능성이 높게 된다. 반대로 말하면, 내측레일의 두부상면 또는 차륜플랜지 접촉부의 마찰계수를 작게 함으로써 큰 횡 크리프 힘의 발생을 억제하여 탈선을 방지할 수가 있다.

이상의 예에서도 차륜과 레일 간에 작용하는 크리프 힘의 특성을 파악하는 것은 차량의 운동을 이해하기 위해서도 중요함을 알 수가 있다고 생각된다.

3. 크리프 힘의 특성과 차량운동 해석

상기와 같이 크리프 힘은 차량의 운동특성에 큰 영향을 준다. 현재, 크리프 힘의 이론적인 연구는 종 · 횡의 미끄럼이나 스핀(spin)이 혼재된 3차원적인 비선형 특성을 다루는 Kalker의 이론으로 대성(大成)되었다고 알려져 있다. 오늘날 철도차량의 운동해석에서는 Kalker의 크리프 힘 이론 중에서도 특히 단순화 비선형 이론의 고속계산알고리즘 FASTSIM에 의한 크리프 힘의 계산이 일반적으로 이용되고 있다.

차륜과 레일 간에 생기는 접촉면의 형상과 접촉면 내의 압력분포는 Hertz의 접촉이론에 따른다고 하는 가정 하에서 크리프 힘을 산출하는 FASTSIM에서는 Hertz의 접촉이론으로 얻어지는 접촉형상(타원)의 장단경비(長短徑比), 접촉면 내에 작용하는 종(縱)미끄럼비율, 횡(橫)미끄럼비율 및 스핀(여기서, 이들의 미끄럼 파라미터는 접촉타원 중심에서의 값이라고 가정한다), 그리고 마찰계수라고 하는 파라미터가 크리프 힘의 계산에서 필요하다.

실제의 차량운동 해석에서 FASTSIM에 주어지는 접촉타원의 장단경비나 미끄럼 파라미터를 미리 알기 위해서는 차륜과 레일이 어떻게 접촉되어 있는가를 알 필요가 있다. 이 차륜과 레일의 접촉위치를 구하는 문제는 기하학적으로 다루는 것이 일반적이며, 접촉기하 문제라고 불리고 있다. 차륜과 레일의 접촉위치는 차륜이나 레일의 단면형상, 차륜답면 중심위치에서의 차륜반경, 레일의 궤간, 궤도의 선형(곡선 등), 레일에 대한 차륜의 상대적인 위치관계와 같은 다양한 정보를 이용하여 구하게 된다. 이 문제는 3차원의 비선형적인 문제이기 때문에 차륜이나 레일이 마모된 때의 형상이나 차륜과 레일이 복수의 위치에서 접촉되는 경우 등을 다룰 필요가 있기 때문에 해를 얻기가 매우 어려운 문제이다. 그러므로 차륜과 레일의 접촉기하 문제는 차량운동 해석에서 중요한 분야의 하나이다.

4. 크리프 힘의 측정

크리프 힘은 이론적으로는 상기와 같은 방법으로 구해지지만, 실제의 차륜과 레일 간 크리프 힘은 어떻게 측정할 수 있는가? 크리프 힘은 상기와 같이 접촉면 내의 미끄럼에 의해 생기므로 접촉면에 발생되는 크리프 힘과 그곳에서의 미끄럼비율을 측정할 수 있으면 크리프 힘의 특성을 알 수가 있다. 그러나 윤축의 운동에 따라서 굴러가는 차륜의 접촉위치는 시시각각으로 변화되므로 그곳에서의 크리프 힘을 하나하나씩 측정하기가 용이하지 않다. 그러므로 생각할 수 있는 하나의 방법으로서 크리프 힘이나 접촉위치 등을 직접 측정하는 것이 아니고 윤축의 자세 등에 관한 측정결과를 차륜과 레일의 접촉기하에 적용하여 접촉위치를 특정하고 그 정보를 이용하여 크리프 힘이나 미끄럼비율의 실험치를 간접적으로 얻는 방법이 있다.

차량의 주행안전성을 확인하는 시험 등에서는 통상적으

표 1. 차륜과 레일 간의 주된 개재이물

환경 · 가상 상 개재하는 이물	대기 중의 오염, 건널목의 오염, 물, 눈, 결빙, 쇳녹, 생물, 낙엽, 벌레, 해수, 황사
열차운행 상 개재하는 이물	차륜과 레일의 마모가루, 제동 슈의 마모가루, 유연(油煙, oil mist)類, 분니, 세면소의 배수
의도적으로 개재시키는 이물	점착증가제(모래, 세라믹스), 윤활제(기름, 그리스, 기타), 각종 마찰조정재, 레일도금

로 윤하중 (차륜 상하방향의 힘)와 횡압 (좌우방향의 힘)라고 하는, 차륜에 작용하는 힘을 측정한다. 또한, 윤축의 어택 각이나 궤도에 대한 상대적인 좌우변위를 알 수 있으면 접촉기하의 계산으로부터 차륜과 레일 간의 접촉각 등과 같은 정보를 얻을 수가 있다. 접촉기하의 계산으로부터 얻어진 정보를 이용하면, 윤하중 나 횡압 가 작용하는 방향과 접촉면 내에 작용하는 크리프 힘의 방향을 관계붙일 수가 있으므로 크리프 힘의 실험치를 간접적으로 얻을 수가 있다. 예를 들어, 올라탐 탈선 개시상태에서의 횡 크리프 힘의 경우에 그림 12(c)에서 추찰되는 것처럼 윤하중과 횡압, 그리고 차륜과 레일의 접촉각을 알 수 있으면 횡 크리프 힘을 구할 수 있다. 또한, 윤축의 회전각속도를 측정하고 그것과 접촉위치에서의 차륜반경(회전반경)을 이용하면 접촉위치에서의 차륜의 속도를 알 수 있으므로 미끄럼비율을 구할 수가 있다. 크리프 힘을 발생시키는 미끄럼은 대단히 미소하기 때문에 윤축의 회전각속도의 측정에서는 높은 정밀도가 필요한 점에 유의할 필요가 있다.

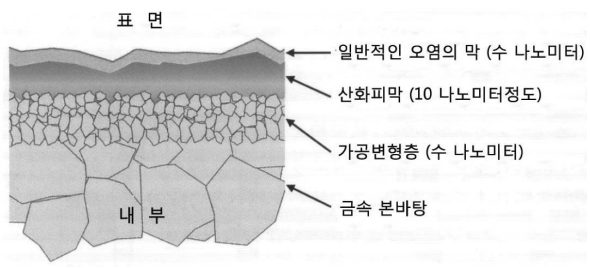

그림 13. 금속의 표층구조를 나타내는 모식도

Ⅳ. 차륜과 레일 간의 이물개재 문제

1. 차륜과 레일 간의 개재 이물

현행의 차륜과 레일은 강성이 높은 고탄소강을 재질로 사용하고 있지만, 쌍방의 접촉점에 가해지는 큰 하중으로 양쪽 접촉부에는 변형이 생긴다. 이에 따라 차륜과 레일 간에는 약 1 cm^2의 접촉면이 형성된다. 이 접촉면 내에는 통상적으로 여러 가지 이물(異物)이 개재된 상태에서 열차가 운행되며 개재이물의 종류와 량(두께)이 차륜과 레일 간에서 일어나는 여러 가지의 현상에 영향을 미친다. 표 1은 개재이물의 종류를 나타낸 것이며, 언뜻 보기에 깨끗하다고 생각되는 접촉면에서도 미시적으로 관찰하면 그림 13에 나타낸 것처럼 나노미터(10^{-9} m) 단위의 이물이 부착되어 있다. 그림 중의 '일반적인 오염의 막' 이란 대기 중에 존재하는 분자 사이즈의 유기물, 또는 산소나 물 분자 등으로 구성되어 있다. 이와 같이 표면이 건조된 상태에서의 차륜과 레일 간의 마찰계수(점착계수)는 0.4 전후이며, 고무타이어와 아스팔트노면 간의 마찰계수에 비하면 작지만, 차량의 가속 또는 감속 시에 문제가 발생되는 일은 없다. 그러나 우천 시나 결로 등으로 레일에 물이 부착되면 점착계수가 저하되어 경우에 따라서는 차륜의 공전이나 활주가 발생된다. 또한, 비가 갠 후에 레일상면에서 생성되는 붉은 쇳녹은 다량으로 퇴적된 경우에 궤도회로의 단락(短絡, 윤축이 좌우레일을 short circuit시키는 것) 상태를 나쁘게 하는 것이 알려져 있다.

또한, 연선환경이나 기상조건에 따라 초래되는 개재이물과 열차운행 시에 생기는 개재이물은 일부의 쇳녹과 금속계의 마모기루를 제외하고 정도에 차이는 있지만 차륜과 레일 간의 점착계수를 감소시키는 물질이다. 이들은 다량으로 개재되기도 하고 복수가 경합된 경우에 공전이나 활주라고 하는 문제를 발생시키기 때문에 점착계수를 증가시키는 대책으로 예전부터 '모래살포' 를 행하여 왔다.

한편, 환경이나 기후의 영향이 적은 지하구간이나 열차 횟수가 많은 도시철도의 경우는 상기의 이야기와 상당히 다르다. 특히, 급곡선 주행 시의 차륜플랜지와 곡선 외측레일 측면의 접촉부 및 차륜 주행면과 곡선 내측레일 주행면의 접촉부는 심하게 서로 문질러지기 때문에 쌍방의 표층

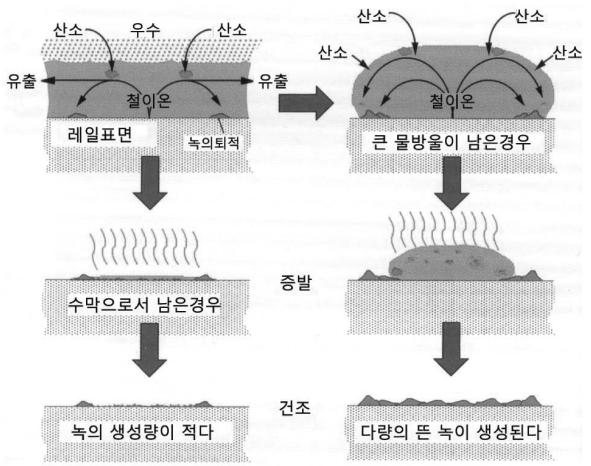

그림 14. 쇳녹의 생성과정을 나타내는 모식도

부가 마모되어 금속 본바탕이 노출된 상태로 된다. 이와 같이 개재이물이 대기성분 이외에 없는 상태에서는 차륜과 레일 간의 마찰계수가 0.6 이상으로 되는 일도 자주 있다. 또한, 보통레일보다 단단한 열처리 레일 사용개소에서 레일의 차륜 주행면 내에 핑크 색의 변색 대(帶)가 보이는 일이 있다. 마찰계수 측정기에 한한 이 부분의 마찰계수 측정치는 0.7 전후로 대단히 크며, 적색계의 색인 점에서 이 대(帶)는 레일표층에 생성된 삼산화이철(Fe_2O_3)로 추정할 수 있다. 곡선구간에서 마찰계수의 증대는 내측레일 주행면의 '파상마모' 나 '마찰소음(squeal noise)' 발생의 원인으로 되는 점에서 최근에는 내측레일 주행면의 윤활이 각 방면에서 주목되고 있다.

2. '쇳녹' 이 일으키는 여러 가지 현상

'쇳녹' 이란 철이나 철합금의 부식생성물 중에서 물에 녹지 않는 물질의 총칭이다. 전술의 삼산화이철(Fe_2O_3)도 쇳녹의 일종이지만, 통상적으로 잘 보이는 레일면의 쇳녹은 주로 옥시수산화철(FeOOH)이다. 이 옥시수산화철에는 α형, β형, γ형, 무정형 등 복수의 유형이 있으며 생성직후는 레몬색이나 오렌지색을 하고 있다. 그러나 시간이 경과되면, 서서히 다갈색(茶褐色)으로 변화된다. 통상적으로 레일에 생긴 붉은 녹은 차륜의 주행에 따라 없어지는 한편으로 차륜답면에도 부착된다. 또한, 열차횟수가 적은 선구에서는 붉은 녹이 없어진 레일면이 거무스름해져 있는 경우가 많이 보인다. 이것은 산화철(FeO)이나 사산화삼철(Fe_3O_4) 등의 검은 녹이며 치밀한 피막으로서 존재하고 있다. 검은 녹은 붉은 녹에 비하여 절연성이 낮기는 하나 수 미크론 정도로 퇴적되면 단락현상에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 검은 녹은 점착계수를 내리는 물질이며, 한산선구에서 낮은 점착현상 요인의 하나로 알려져 있다.

고온다습한 장마철로 되면 레일의 쇳녹에 기인하여 단락불량이 발생될 가능성이 높아진다. 차륜이나 레일은 원래 녹이 슬기 쉬우며, 닦여진 레일표면에 떨어진 물방울은 간단히 쇳녹을 발생시킨다. 쇳녹의 생성과정은 pH나 온도 조건에 따라 다양하게 변화된다. 쇳녹의 생성과정 중에 생기는 녹색(綠色)의 녹은 황산이온이나 염소이온 등의 존재하에서 생성되며, 불안정한 물질이기 때문에 시간의 경과와 함께 다른 종류의 쇳녹으로 변한다.

레일면의 쇳녹 문제로서 단락불량 발생개소에 공통된 사항 중에서 레일의 특징으로서는 두부상면의 마모가 거론된다. 이것은 레일두부 상부가 평탄하게 되는 것으로 다량의 뜬 녹(표면에 가루가 발리진 상태)이 생성되기 쉬운 상황을 초래하기 때문이라고 생각된다. 게다가, 평탄한 레일두부 상부는 차륜답면과의 접촉압력을 저하시키기 때문에 일반적으로는 개재이물의 영향이 현저하게 나타나기 쉬운 상태로 된다. 구체적으로는 그림 14에 나타낸 것처럼 강우 후에 발생되는 쇳녹의 양이 표면에 남은 물의 양에 따라 다르며, 큰 물방울일수록 다량으로 뜬 녹을 생성시킨다. 평탄한 레일두부 상부는 큰 물방울이 남기 때문에 열차의 통과가 없는 시간대에 증발이 진행되면 다량의 뜬 녹이 발생된다. 더욱이, 쇳녹의 생성과정은 전기화학반응 때문에 레일에 흐르는 전류도 영향을 주는 복잡한 현상이다. 어쨌든 "레일 주행면을 항상 물이 없는 좋은 상태로 유지함으로써 뜬 녹의 발생을 적게 할 수 있다"고 생각된다.

한편 레일표면에 부착된 녹(옥시수산화철)의 마찰특성은 녹 입자의 크기, 양, 마찰속도 등에 따라 변화된다. 특히, 속도의존성이 크고 비교적 높은 정(靜)마찰계수와 낮은 동마찰계수의 관계에서 접촉부에 마찰진동이 생기기 쉬운 상황을 초래한다.

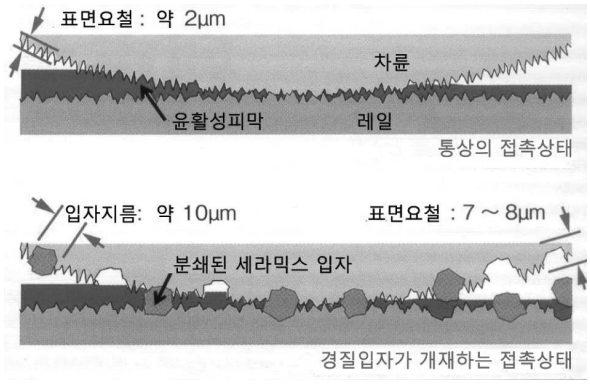

그림 15. 경질입자의 개재를 나타내는 모식도

3. 마찰제어를 목적으로 개재시킨 물질

점착증가재료 분사장치에 사용되는 '점착증가재료' 나 마찰완화시스템용으로 개발된 '마찰완화재료' 는 어느 쪽이나 직경이 0.3 mm 정도의 입자이며 차상에서 차륜과 레일 사이로 공급하여 접촉부의 마찰 상태를 개선하기 위하여 사용되는 물질이다.

(1) 세라믹스계열 점착증가재료

차륜과 레일 간의 저(低)점착 문제에 대하여 예전에는 '모래살포' 라고 하는 해결책을 찾아낸 이후에 '큰 입자의 모래(작은 자갈)가 부수어질 때의 저항이야 말로 점착력 증대의 근원' 이라는 사고방식이 주류를 점하고 있었다. 그렇지만, 기초적인 실험 등을 진행한 결과, 모래알 등의 경질입자에 의한 점착증가기구는 ① 점착계수는 공급입자의 입경에는 의존하지 않는다, ② 공급입자는 차륜과 레일 간의 접촉압력에 견디는 크기까지 부수어지고 나서 접촉면 내에 들어가고 그 크기는 입자의 기계적인 강도에 의존한다, ③ 부수어진 이들의 미립자가 접촉면 내에 일층으로 늘어선 상태에서의 효과는 포화되기 때문에 종래의 모래살포와 같은 양은 불요하다, ④ 기름이나 낙엽 등의 피막이 두껍게 되는 엄한 조건하에서는 기계적인 강도가 높은 재료의 사용이 바람직하다, 등이 밝혀져 있다.

실제로 공전이나 활주가 문제로 되는 것은 물, 기름, 낙엽 등의 윤활성 피막으로 차륜과 레일 간의 접촉이 방해되어 금속끼리가 접촉하여 있는 면적이 감소되는 경우이다. 특히 고속영역에서는 예를 들어 점성이 낮은 물이라도 속도의 상승과 함께 그 피막도 증가되기 때문에 그와 같은 상황에서는 그림 15에 나타낸 것처럼 그들의 피막을 관통하여 차륜과 레일 간에 힘을 전하기 위한 물리적인 돌기나 앵커를 접촉표면에 만드는 것이 가장 효과적이며, 비용 대 효과의 관점에서는 알루미나(산화알루미늄)가 실용적인 세라믹스재료로서 선정된다.

더욱이, 알루미나 자체는 절연재료이지만, 소량의 사용조건에서는 접촉부의 쇳녹 층을 파쇄하여 단락을 촉진시키는 효과가 있는 점도 큰 장점이다.

(2) 카본계열 마찰완화재료

곡선구간에서는 차륜과 레일 간의 마찰계수 증대에 따른 내측레일 주행면의 '파상마모' 나 '마찰소음(squeal noise)' 등의 발생이 문제로 되어 있다. 그 대책으로 내측레일 주행면의 윤활이 매우 효과적이다. 그러나 극단으로 마찰계수를 저하시키면 이번에는 점착상의 문제가 부상된다. 그러므로 일반적인 윤활유와는 다른 '마찰완화재료' 가 개발되었다.

마찰완화재료의 최대특징은 '건조한 고체입자' 를 사용하는 점에 있다. 마찰완화의 유효성분에는 카본계열 윤활제인 그래파이트(graphite, 흑연)가 선정되었지만 그 이유로서 ① 다른 고체 윤활제{예를 들어, 이황화 몰리브덴(MoS2)이나 불소계열 수지(PTEF) 등}에 비하여 값이 싸다, ② 마찰완화 성능을 좌우하는 카본입자 내의 흑연화도(비정질 탄소와 흑연의 비율)를 열처리로 조정할 수 있다, ③ 도전(導電)성을 갖고 있어 차륜과 레일 간의 전기적 접촉을 방해하지 않는다, ④ 화학적으로 안정되어 있어 환경이나 생태계에 영향을 미칠 염려가 없다, 등이 열거된다. 또한, 마찰완화재료의 윤활기구는 층상구조를 가진 고체 윤활제 특유의 것으로 육방(六方)정형(晶形)이라 불리는 결정구조 내부에 생기는 미끄럼이 그대로 윤활작용으로서 나타난 것이다. 그러므로 마찰계수의 속도의존성이 적고 안정된 마찰상태가 얻어진다.

Ⅴ. 맺음말

본고에서는 일반철도에서 발생되는 백색(白色)층(마텐자이트 · martensite) 기점의 쉐링이나 내(耐)쉐링鋼 레일의 베이나이트(bainite) 레일, 궤도회로 단락 등은 소개하지 않았지만 차륜과 레일의 전동접촉에 관한 최근의 화제로서 마찰 · 점착을 중심으로 소개하였다. 또한, 차량의 운동에 크게 관계되는 크리프 힘과 그 특성에 관하여 소개하고, 차륜과 레일 간에 개재하는 물질이 일으키는 현상에 관하여 소개하였다.

차륜과 레일 간에 생기는 여러 문제는 다종다양하며, 현상에서는 개별적으로 대책이 강구되고 있다. 그러나 개개의 대책이 새로운 문제의 종류로 되는 경우도 있다. 본고가 차륜과 레일 간의 접촉문제에 관한 대책을 진행할 때에 참고가 되기를 기대한다.