차륜 · 레일의 인터페이스에 관한 안전성의 향상

| 서 사 범 |
삼표이앤씨(주) 기술연구소장
공학박사 · 철도기술사

Ⅰ. 머리말

철도에서 막대한 피해가 생기는 사고는 탈선, 충돌, 전복의 형태로 발생되고 있다. 이 3 형태는 단독으로 발생되는 경우와 복합하여 발생되는 경우가 있다. 탈선된 열차에 대향 열차가 충돌하는 복합사고의 경우에는 극히 불행한 결과로 된다.

'탈선' 은 차륜과 레일의 양자가 그 역할을 충분히 발휘할 수 있는 상태이라면 발생되지 않지만 차륜의 위에는 스프링 시스템을 통하여 차체가 얹혀 있고 레일은 스프링 시스템을 통하여 노반 위에 놓여 있기 때문에 종합안전을 확보하기 위해서는 이들의 종합적인 기능이 만족되어 있어야만 한다. 이를 의논하기 위해서는 이들의 종합적인 운동론이 필요하지만 본고에서는 일부만을 다룬다.

'충돌' 의 요인으로서는 본고의 범위가 아닌 기관사의 기기조작, 신호관계 등이 요인으로 되는 케이스가 많기는 하나 차량과 레일간의 이물질에 의한 제동부족 상태도 요인으로 될 수 있기 때문에 이에 대하여 검토하였다.

'전복' 은 곡선에서의 속도초과가 요인으로 되든지 강풍 등의 자연조건이 요인으로 되기 때문에 후술의 표 1에서 검토하였지만 차륜 · 레일 자체가 요인으로 되는 현상은 찾아낼 수가 없었다.

본고에서는 차륜과 레일의 단면형상 · 점착현상 · 궤도회로 단락불량에 대한 설명과 함께, 탈선, 충돌, 전복에 대하여 논의한다.

Ⅱ. 레일과 차륜의 역할

독자들도 잘 알고 있는 것처럼 철도차량과 궤도가 접촉되는 개소는 차륜과 레일이다. 레일은 노반, 교량 등을 포함한 궤도전체로서 차량을 지지함과 함께 차량을 적절한 방향으로 안내하는 역할을 갖고 있다. 한편, 차륜은 스프링 시스템을 통하여 차륜 위에 실려 있는 대차, 차체를 지지하면서 열차가 원활하게 주행하는 역할을 담당하고 있다.

레일은 파단 등이 없고 두부형상이 일정한 형상을 유지하고 있으면 레일자체가 원인으로 되는 탈선은 발생되지 않는다. 그러나 레일체결장치, 침목, 도상 등이 적절한 상태로 유지되지 않으면 궤간이 확대되기도 하고 궤도좌굴이 생겨 탈선에 이르는 위험성이 증대한다. 또한, 차륜은 적절한 하중을 부담하고 적절한 답면형상과 차륜간격을 유지하고 있으면 차륜이 원인으로 되는 탈선이 생기는 일은 없다. 그러나 차축의 절손, 대차 프레임의 균열 등이 발생되면 탈선에 이를 위험성이 증대한다.

한편, 차륜과 레일의 접촉부분에서는 차량의 가속, 감속의 토크를 전달하는 역할을 담당하고 있지만 열차의 주행에 따라 양자에서 피로손상이나 마

모가 발생되기 때문에 일상의 보수가 극히 중요하다. 이들의 현상에 대한 발생메커니즘의 해명과 해결책이 진행되고 있지만 미해결의 부분도 있기 때문에 그 진전이 요망된다.

Ⅲ. 탈선, 충돌, 전복에 관한 현상과 요인

표 1에 탈선, 충돌, 전복에 이른다고 상정되는 차륜과 레일에 관련되는 요인을 나타낸다. 이하에서는 이 표에서 * 표시로 클로즈업한 사항에 관하여 논의한다.

Ⅳ. 각종 발생 사상(事象)의 메커니즘 등

1. 대차 프레임 절손

대차 프레임은 2축 또는 3축의 윤축(차륜과 차축이 조합된 것)이 조립되고, 차체와의 사이에서 스프링 시스템을 통하여 차체를 지지하고 있다. 이 차체를 지지하는 중요한 부재인 대차 프레임에 균열이 생기면 대차 프레임 내 윤축의 평행도가 유지될 수 없기도 하고 윤축의 회전을 저해하게 되어 차륜과 레일의 접점이 異常의 위치관계로 되기 때문에 탈선에 이를 우려가 발생된다. 대차의 크로스 빔(차축

표 1. 탈선, 충돌, 전복에 관한 사상(事象)과 요인

* 표시는 본고에서 대상으로 하는 건명

사고 형태	원인으로 되는 사상(事象)				요인		
					차량	궤도	자연환경
탈선	차륜지지 불능	대차부품 손상	차축절손	휨 피로 저대 윤하중	차륜플랫	레일두부상면 요철	
				차축 베어링의 타서 눌러 붙음	윤활유열화 · 양 부족		
					전식		
					굴림대 유지 장치 손상		
			*대차프레임 절손	용접부위피로	용접불량, 용접구조		
			차륜 균열손상	열 균열, 과열	노면제동 완해불량		
				피로균열 저대 윤하중	차륜플랫	레일두부상면 요철	
			윤축외면치수변화		차륜압입 불량		
		열차좌굴(휴)	운전취급 불량				
		*레일파단	이음매구멍으로부터의 손상	휨 피로 저대 윤하중	스프링 하 질량 대(大)	이음매 처짐	
			용접이음 파단			용접불량	
			분기기 손상			망간 크로싱 등 제조결함	
			쉐링(백색 층 기인을 포함)	접촉피로	활주		비, 물
			삐걱거림 균열	접촉피로			
		*궤도좌굴		축력 증대 횡 저항력 저하		작업불량	고온, 지진
		*궤간확대, 레일전도			저대 횡압 (대차 전향성능 불량)	레일 체결력 · 지지력 저하	
		도상함몰(자)					비
		플랜지웨이 압설(壓雪) 올라탐(자)					눈, 저온
		분기기에 부정확한 잔입(신)	궤도회로 단락불량		접촉면 이물질(녹, 오염)		
			신호시스템 불량				
			확인소홀, 신호무시(휴)				
	차량 · 궤도 상호작용	*올라탐 탈선	탈선계수 대	윤하중 감소	정지윤하중 언밸런스, 대차조립불량		
					차량 비틀림 강성 대(大) (축 스프링 특성, 베어링유간)	평면성틀림	
						이음매 처짐	

					차량 롤 강성 대(大)	캔트 과대	
				횡압증대	대차전향성능 불량	이음매각꺾임 줄 틀림(곡률 小)	
					안쪽레일 측의 차륜/레일마찰계수 대(大)		건조
			한계탈선계수 저하		바깥쪽레일 측의 차륜/레일마찰계수 대(大)		건조
			안전여유도 저하			레일단면형상 (게이지코너각도 小)	
		사행동, 차량동요			차륜 답면 형상	레일단면형상	
					댐퍼, 스프링특성변화, 반동	궤도틀림 (특히, 복합틀림)	
		로킹(rocking)(자)		궤도 대진동			지진
					차륜 답면 형상 이상 • 플랜지 직 마모 • 차륜 불회전에 따른 저대 플랫	텅레일단면형상 이상	
						분기기조정 불량	
				운전취급(휴)			
충돌	*제동거리 증대	*활주			차륜답면 거칠기 부족		눈, 비
					접촉면 이물질(油脂, 낙엽, 벌레)		
			라이닝/디스크, 제륜자/답면 고착		제륜자가 차륜을 파먹음		
					링크부류의 불량		
		*제동력 부족(슈/답면 간의 마찰력부족)			눈과 비 개재		눈, 비
				콕 부류 취급(휴)	콕(cock) 부류의 파손		
		* 브레이크제어 불량			브레이크제어시스템		
	제동거리 부족	*궤도단락 불량			접촉면 이물질(녹, 오염)		
		신호시스템불량(신)					
전복	곡선속도 초과(휴)			초과원심력	중심고, 공기스프링 횡강성 등		
	횡풍(橫風)(자)			공기력	차체단면형상, 중심고, 공기스프링 횡강성 등		강풍

(신) 신호보안 시스템 관련, (휴) 휴면에러의 사고방지 관련, (자) 자연재해 관련

에 평행한 부재)과 사이드 빔(레일에 평행한 부재)과의 용접부분에 균열이 생기는 사례가 있다. 이 용접부분은 차체 질량을 차륜에서 레일로 전달하는 경로에 직면하고 있기 때문에 정적인 응력 및 윤축과 차체 진동의 차이에 따른 충격적 · 반복응력이 작용한다.

이 용접부분 이외의 용접부분도 주행에 따른 정적 · 동적응력의 반복이 있기 때문에 균열이 발생될 우려가 있다. 이 균열은 제조한 직후에는 없고 주행거리가 증가됨과 함께 균열이 발생되어 진전되는 것이 있다. 이 때문에 대차 프레임에 대하여는 자분탐상, 침투탐상 등을 이용하여 정기적으로 세밀히 검사할 필요가 있다. 균열의 발생에 대하여는 사전의 강도계산에서 해당 개소에 작용한다고 상정되는 응력에 대응하여 모재의 허용응력에 일정한 안전율을 곱한 후에 구조를 결정하고 있지만, 용접작업의 양부에 따라서는 균열이 생기는 케이스가 있다. 또한, 설계단계에서도 용접의 용이성, 적절한 용접 틈의 설정 등을 고려하여 두는 것이 중요하다. 설계 시에 전망한 작용력이 적절하지 않은 경우에는 피로균열의 발생에 이르는 경우가 있기 때문에 신형식 차량 · 대차의 주행시험 시에는 발생응력의 측정을 빠뜨리면 안 된다.

2. 레일 파단(破斷)

레일이 물리적으로 분리되는 현상, 즉 '레일 파단(破斷)'은 그 발생 메커니즘 및 파손의 형태로부터 파단(破端), 용접부위 손상, 레일 쉐링, 삐걱거림 균열, 부식 · 전식 등으로 분류할 수 있다.

(1) 파단(破端 주로 이음매구멍으로부터 균열)

레일이음매판과 레일의 접촉부분에서 미소한 슬립을 수반하는 마찰의 반복에 따른 균열이 발생되어 이것이 레

일 길이방향의 수평균열로서 파단(破斷)에 이르는 경우가 있으며 이음매의 볼트구멍으로부터 45도 방향의 균열이 발생되어 파단에 이르는 경우도 많다. 균열의 진전은 미세균열에 가하는 응력의 크기에 따라 변화되기 때문에 레일의 변형이 적게 되도록 함으로써 균열의 진전을 억제할 수 있다.

(2) 용접부분

이음매부분은 레일에서 약점개소이기 때문에 이 약점을 해소하기 위하여 레일을 장대화하는 수단으로서 레일 용접방법이 적용되고 있다. 용접방법에는 플래시버트용접, 가스압접, 엔크로즈드 용접, 테르밋용접의 4 종류가 있으며 각각 작업조건, 용접강도 등의 득실이 있다. 어느 경우도 용접에 따른 열 영향에 기인하여 연화(軟化)부분이 형성되어 차륜으로부터의 전동하중을 받음에 따라 레일표면에 요철이 형성되고 이 요철로 인하여 윤하중변동(진동)이 발생된다. 한편, 용접부분은 레일모재부분보다는 피로강도가 저하되어 있기 때문에 용접부분으로부터의 파단 예도 있다.

대책으로서는 용접부분에 발생되는 과대한 응력을 억제하기 위하여 정기적인 레일요철의 평활화와 이음매 처짐의 정정이 중요하다.

(3) 쉐링

이것은 전동접촉 피로손상의 일종이며 차륜과 레일의 미소돌기끼리의 큰 접촉응력으로 인하여 소성변형이 생기고 그 반복에 따라 발생 · 성장하는 균열이 일반적이다. 또한, 차륜의 활주 등에 기인하는 열 변태로 인하여 레일표면에 백색 층이 형성되어 이것을 기점으로 하여 전동하중을 받아 성장하는 균열도 있으며, 이들을 쉐링이라고 부르고 있다.

쉐링에 대하여는 균열이 발생되는 메커니즘이 충분히 해명되어 있다고는 하지 않지만 균열의 성장에 대하여는 파괴역학을 기본으로 한 예측모델의 연구가 진행되고 있다. 또한, 균열의 성장에 관한 영향인자로서는 윤하중변동, 장대레일 축력에 의한 응력, 수분(건조한 터널에서의 발생은 극히 적다), 균열 주위의 잔류응력 등이 영향을 주고 있다고 생각된다.

대책으로서는 전동피로 층의 정기적(예 : 통과톤수 0.5억 톤에서 0.1 mm, 0.4억 톤에서 0.08 mm)인 연삭이 있으며, 쉐링의 발생을 억제하는데 효과가 있음이 실증되어 있다. 또한, 스스로가 마모되는 것으로 연삭과 같은 효과를 발휘하는 베이나이트(bainite)강 레일의 적정한 사용도 시험되고 있다.

(4) 삐걱거림 균열

삐걱거림 균열은 곡선의 바깥레일 측에서 차륜플랜지부분이 레일두부상면의 코너부분(게이지 코너)과 접촉되는 부분에 레일 단면방향으로 연속적으로 발생되는 아주 작은 균열이며, 부분적인 박리를 수반하는 경우도 있다. 또한, 이 삐걱거림 균열이 진전되어 레일파단에 이르는 경우도 있다. 균열이 현재화되는가의 여부는 레일의 마모속도와 피로균열이 진행되는 속도의 어느 쪽이 우세한가에 따라서 결정되며, 마모속도가 빠른 급곡선 그 자체에서는 발생되지 않고 급곡선의 완화곡선구간, 반경이 비교적 큰 곡선에서 발생된다.

이 대책으로서는 횡압을 저감하기 위한 곡선 바깥레일 측의 윤활(예 : 차륜플랜지 도유)이나 안쪽레일 측의 레일두부상면 윤활, 미소 균열의 단계에서 피로 층의 제거를 목적으로 한 연삭 등이 효과적이다.

(5) 부식 · 전식에 기인하는 균열

레일의 부설장소에 따른 부식 환경(해저터널, 누수 터널, 건널목 등)에서 레일에 부식구멍이 형성되는 경우('레일부식'), 주로 직류구간에서 레일저부와 스파이크 또는 레일체결장치, 도상과의 접촉부분에 부식구멍이 형성되는 경우('레일전식')가 있으며, 각각의 부식구멍을 응력집중의 기점으로 하여 발생 · 성장하는 균열이 문제로 된다.

부식대책으로서는 레일표면을 코팅하는 방법이 고안되어 유효성이 확인되고 있다. 전식에 대하여는 레일로부터 침목, 도상으로의 누설전류를 억제하는 것이 효과적이지만, 실현가능한 방법은 발견되지 않았다.

(6) 레일파단과 탈선의 관계

레일의 부분적인 결손의 경우는 결손된 부분의 길이가 요인으로 되지만, 레일파단의 경우에는 레일파단 그 자체에서 곧바로 탈선에 이르는 것이 아니라 파단 시의 벌어짐(開口) 량이 탈선의 요인이라고 생각된다.

자갈궤도에서는 레일과 침목이 일체로 되는 설계로 되어있기 때문에 레일 길이방향으로 레일이 이동하는 경우에는 침목도 동시에 이동한다. 이 때문에 레일에 파단이 생겨도 벌어짐 량이 극단으로 크게 되는 일은 없다.

한편, 슬래브궤도에서는 레일의 팽창신축이 발생된 경우에 슬래브 판의 이동을 방지하도록 돌기부분이 파손되지 않는 설계로 되어있기 때문에 레일체결장치와 레일 간은 일정 이상의 축력이 발생되면 상호로 미끄러지는 구조로 되어 있다. 따라서 장대레일이 무엇인가의 원인으로 파단된 때에는 벌어짐 량이 크게 되는 경우가 있기 때문에 레일체결장치의 체결력은 될 수 있는 한 한도치에 가까운 값으로 관리하여 두어야만 한다.

3. 궤도 좌굴

여름철의 혹서 등에 따라 레일온도가 상승하게 되어 궤도의 좌굴강도 이상의 레일 축 방향 압축력이 발생되면, 궤도에 좌굴현상이 생겨 극단적인 줄 틀림이 발생된 것과 같은 상태로 되기 때문에 열차탈선의 위험성이 높아진다. 한냉지에서는 겨울철의 동상대책인 채로 이른 봄에 기온이 급상승하면 같은 모양의 궤도좌굴이 발생될 수 있다.

레일온도가 상승한 경우에 레일유간이 없게 된 정척레일 구간이나 장대레일 부동구간과 같이 레일이 팽창할 수 없는 상태에서는 축력으로서 내부에 힘이 축적된 상태로 되어 궤도가 변형되려고 하고 있다. 이에 대하여 도상이나 레일체결장치의 횡 저항력이 궤도의 좌굴을 억제하고 있지만, 도상이 흐트러짐에 따라서 좌굴현상이 발생된다.

좌굴현상이 발생된 경우에 현재로는 그 검지방법이 없기 때문에 기관사의 육안으로 살피는 것으로 되어 있다. 이것을 담보하기 위하여 궤도좌굴현상이 발생될 수 있는 레일온도로 된 경우에는 보선직원이 경비 순회하여 좌굴의 징조를 찰지(察知)하는 조치가 취해지고 경우에 따라서는 운전규제를 하게 된다.

궤도좌굴의 방지책으로서는 다음과 같은 3 종류의 방책이 고려되어 일부가 적용되고 있다.

① 궤도강도의 증강으로 좌굴현상의 억제(침목의 대형화, 레일체결장치의 강화 등)

② 레일축력이나 도상저항력의 관리강화로 좌굴현상의 예방(장대레일 부설 시에 레일온도의 엄밀한 관리, 궤도 횡 저항력 · 레일축력의 측정, 유간정정 · 장대레일 재설정작업 등)

③ 궤도좌굴 발생 후에 긴급하게 열차를 정지시키는 방책(예 : 레일축력을 상시 측정하여 궤도좌굴로 인하여 개방된 경우에는 정지신호를 발하는 방법)

향후의 과제로서는 레일축력을 상시 측정하는 것이 가능한 실용적 방법, 궤도 횡 저항력의 비파괴 측정방법의 개발이 있다.

4. 제동력 부족으로 인한 제동거리 연신

차륜과 레일의 접촉부분에 낙엽이나 곤충류의 이물질이 들어감에 따라 차륜 · 레일 간의 점착력이 저하되어 활주가 발생되기도 하고, 브레이크슈와 차륜 간에 눈과 같은 이물질이 들어가서 차량이 적절한 감속력을 얻을 수가 없게 됨에 따라 제동거리가 증대되어 선행열차와 충돌하기도 하며, 안전측선의 차막이에 올라타는 경우가 있을 수 있다.

이와 같은 자연현상에 관련되는 사례의 발생과 함께 브레이크부품의 불량, 인위적인 브레이크 콕(cock) 조작 오류로 되는 등에서 제동거리가 부족하게 되어 충돌사고가 발생되는 사례도 있다.

차륜과 레일 간의 점착력을 유지하기 위해서는 답면 청소장치의 설치나 세라믹 분사장치를 이용한 관리방법이 있다. 제륜자와 차륜 간, 브레이크 라이닝과 디스크 간에서의 눈의 개재에 따른 제동력 부족에 대하여는 상시 브레이크를 가볍게 작용시켜 두는 방법(내설 브레이크)이 적용되는 사례가 있으며, 유효한 대책이다. 또한, 자연사상으로서의 낙엽으로 인한 활주에 대하여는 요주의 개소를 설정하여 적절한 시기에 순회 감시하는 방법도 있다.

5. 올라탐 탈선

올라탐 탈선에는 궤도와 차량의 상호작용으로 인한 올라탐 탈선(곡선구간과 분기기구간)과 분기기 텅레일 선단에서의 올라탐 탈선이 있다.

급곡선이나 분기기에서 차륜의 진행방향과 레일이 이루는 각(어택 각)이 크게 되어 차륜 플랜지 부분이 레일 게이지코너 부분에 접촉되고 그 상태로 굴러감에 따라서 차륜이 레일을 기어올라 레일두부 상면을 타고 넘어 탈선되는 일이 있다.

이 올라탐 탈선과 그들의 관련을 그림 1에 나타낸다.

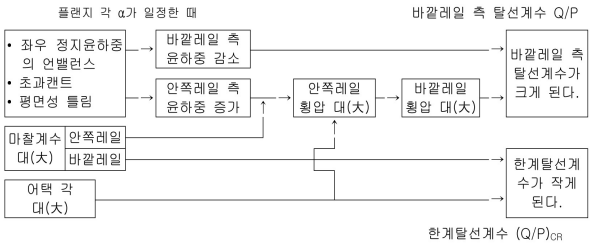

그림 1. 올라탐 탈선의 발생요인

(1) 궤도와 차량의 상호작용으로 인한 올라탐 탈선

(그 1 : 급곡선에서의 저속주행 시의 올라탐 탈선)

이 탈선은 일정한 조건 개소에 대한 탈선방지 레일의 설치, 윤하중 언밸런스의 규제, 궤도평면성의 관리, 바깥레일 연삭 시의 형상, 차륜플랜지각도의 검토, 산정된 추정 탈선계수比에 의한 탈선방지 가드 등의 설치가 대책으로 된다.

(2) 궤도와 차량의 상호작용으로 인한 올라탐 탈선

(그 2 : 차량동요를 수반하는 탈선계수 증대에 따른 올라탐 탈선)

'경합탈선' 은 궤도변위, 차량특성, 운전조건 등이 상호영향을 주어 차량동요가 크게 됨에 따라 바깥레일 측 탈선계수가 증대하여 차륜이 레일에 올라타는 현상이다. 대규모의 주행시험을 포함한 많은 연구의 결과, 차량관계에서는 화차의 주행답면 형상의 변경, 베어링 공극의 변경, 편적 방지대책 등, 궤도관계에서는 탈선방지 가드의 설치, 궤도정비기준의 개정, 복합틀림 정비기준의 제정 등의 대책이 시행되어 이 종류의 탈선사고는 거의 발생되지 않는다.

근년에 컨테이너화물열차와 같은 경우에는 궤도틀림이 연속되는 경우에 하중조건, 주행속도 등에 따라 공진현상이 발생되어 차량동요가 크게 됨에 따라 곡선 바깥레일 측의 윤하중 감소와 횡압증대를 초래하고 탈선계수가 크게 되어 탈선을 야기하는 사례도 있다.

(3) 궤도와 차량의 상호작용으로 인한 올라탐 탈선

(그 3 : 분기기에서의 올라탐 탈선)

분기기의 텅레일과 기본레일이 접하는 개소, 리드레일의 이음매부분에는 어택 각이 급격하게 증대되어 충격적인 바깥레일 측 횡압이 발생된다. 이에 더하여 분기기의 평면성 틀림이 더해짐에 따라 바깥레일 측 윤하중이 감소되면 탈선계수가 크게 된다. 또한, 차륜을 전삭(轉削)한 직후에 분기기 내에서 올라탐 탈선이 발생되는 사례가 있지만, 상기의 상황에 더하여 바깥레일 측 차륜과 레일 간의 탈선계수가 크게 됨에 따라 한계탈선계수가 저하된 것이라고 생각된다(그림1).

이에 대한 대책으로서는 차륜 플랜지의 도유, 차륜전삭 설비의 프레이즈반(fraise盤)에서 선반(旋盤)으로의 변경, 선반의 바이트 작업속도의 변경 등이 탈선계수의 증대경향을 완화시키기 위해 장려된다.

궤도와 차량의 상호작용으로 인한 올라탐 탈선에 대한 대책으로서는 상기 3 종류의 탈선사상 대책과 함께 차량관계에서는 궤도의 평면성틀림이 큰 개소에서도 윤하중감소를 억제하는 것을 목표로 하여 적재와 공차 시에 스프링특성이 다른 축 스프링의 개발과 실용화, 높이 조정밸브를 제어하는 방법이 검토되고 있다. 한편, 스퀼 음이나 레일의 파상마모를 저감시킬 목적으로 곡선 안쪽레일 두부상면에 마찰 조정제를 도포하여 바깥레일 측에서의 전향횡압을 저감시키는 방법 등이 실용화되고 있지만 결과로서 올라탐 탈선에 대한 안전여유정도를 향상시키게 된다.

또한, 차량의 상태를 알기 위하여 특정의 곡선구간에서 윤하중 · 횡압 등을 측정하는 방법, 차량 측에서 윤하중 · 횡압을 측정하여 궤도를 평가 관리하는 방법이 실용화되고 있으며, 차륜과 레일 상호의 상태감시시스템이 실용화의 단계에 있다.

(4) 분기기 텅레일 선단에서의 올라탐 탈선

텅레일 선단의 변형, 차륜플랜지의 직립마모에 따라 텅레일의 선단과 플랜지의 선단이 접촉하여 차륜플랜지의 안내기능을 잃어버린 상태로 되어 차륜이 텅레일에 올라타서 탈선하는 사례가 있다.

그 대책으로서는 텅레일 · 기본레일의 마모관리, 차륜의 직립마모 관리와 함께 분기기 내의 가드레일 설비가 유효하다.

6. 궤간 내 탈선

궤간확대로 인하여 열차탈선사고가 발생되는 것이다. 차량이 곡선구간을 주행할 때에 차량이 받는 원심력과 대차의 전향횡압이 바깥레일에 횡압으로서 작용한다. 이 힘이

레일을 외측으로 밀어내는 방향으로 작용함에 따라 궤간확대가 생기게 된다. 이와 같은 횡압은 궤도구조로서 레일과 침목을 물리적으로 일체화하고 있는 레일체결장치에서 받아들이고 있지만 레일과 침목의 체결력이 저하되어 있는 경우에는 레일이 변칙경사 · 전도 · 압출되어 궤간확대가 발생됨에 따라 안쪽레일 측의 차륜이 궤간 내로 탈선하게 된다. 궤도설비의 조건에서 역구내에서의 발생이 많다.

발생요인으로서는 급곡선, 목침목의 부식, 큰 윤하중 등이 있지만 일상의 보수로서 스파이크 주변의 상태검사(스파이크와 레일의 간극, 레일이 횡 이동한 흔적, 바깥레일 게이지코너의 마모 등)가 중요하다.

대책으로서는 발생요인을 배제함과 함께 슬랙의 축소, 목침목의 PC침목화, 레일의 중량화 등이 유효하다.

Ⅴ. 각종 사상에 관한 향후의 과제와 주의사항

탈선, 충돌사고를 없게 하기 위해서는 기본적인 과제로서 설계단계에서 사용조건의 적확한 파악, 적절한 보수작업을 확실하게 실시하는 것이 가장 중요하다. 게다가 보다 합리적인 대책으로서 검토하여야 할 과제에 대하여 각 항목에서 발출한 형으로 다시 정리하면 다음과 같다.

① 보다 목적에 합치되는 검사방법의 개발
- 궤도좌굴에 관하여 실용적인 레일축력 측정방법
- 도상저항력의 비파괴 측정방법

② 손상 등을 수반하는 현상에 관하여 보다 적확한 예측방법의 개발
- 레일용접부분 요철의 성장모델과 새로운 피로피해법칙의 검토
- 레일이음매 강도평가방법의 고정밀화

③ 확실하고 보다 효율적이며 보다 경제적인 보수방법의 개발
- 레일 쉐링에 관하여 연삭주기와 연삭 깊이의 관계
- 레일의 삐걱거림 균열 대책에 대하여 마모와 피로의 밸런스
- 분기기 각부 마모진행의 정량화와 결손형태의 명확화

④ 사고, 손상이 발생되기 어려운 구조, 재료의 개발과 적용
- 평면성틀림이 큰 개소에서도 윤하중감소가 어려운 차체지지구조
- 차량에서의 세라믹 분사장치의 적용확대
- 베이나이트 레일의 평가
- 레일부식에 대하여 적절한 코팅방법

Ⅵ. 차량 각 요소의 영향정도 확인방법

레일은 장거리에 걸쳐 부설되어 있기 때문에 그 대책방법은 부분적인 곡선구간, 분기기구간에서의 대책이 일반적으로 된다. 이에 대하여 차량의 요소는 차량마다의 설정이 가능하기 때문에 지금까지 여러 가지로 대처하여 왔다.

그러나 차량과 궤도의 상호작용은 복잡하며 밸런스가 무너짐에 따라 뜻밖의 위험을 초래하는 일이 상정된다. 이 때문에 차량 각부의 특성을 변경할 때에는 그 변경이 차량운동이나 궤도구조에 대하여 어떠한 영향을 주는가를 충분히 검토하여 그 개선방법이 유효하다는 것을 검증할 필요가 있다. 이들의 검증방법으로서는 다음과 같은 방법이 있다.

- 컴퓨터를 이용한 소프트 시뮬레이션
- 축척모형을 이용한 시험대 시험
- 실물크기의 시험제품을 이용한 시험대 시험
- 실제의 선구를 이용한 실물차량 시험

이들의 방법을 구사하여 순서에 따라 대처함과 함께 피드백하면서 정밀도 향상을 도모하여가는 것, 실물차량 시험 후의 확대 사용에서는 적절한 주기에서의 트레이스(trace)도 중요하다(그림 2).

예를 들어, 차륜마모량을 줄이는 것을 목적으로 하여 차륜 단면형상을 개발할 경우에는 이들의 수단에 확실하게

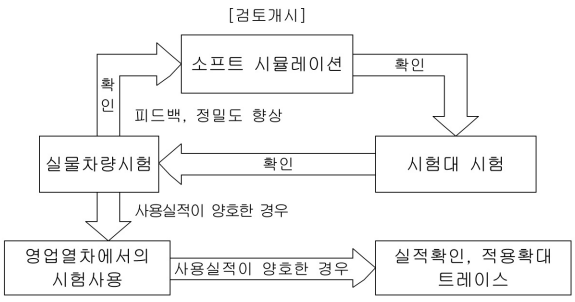

그림 2. 대차 등의 안정성에 영향을 주는 요소기술 개발순서

몰두하는 것은 당연하지만 차륜의 마모를 감소시킴에 따라 레일마모가 증대되는 것은 철도시스템 전체로서 좋은 방향이 아닌 경우도 있을 수 있으므로 트레이스 항목으로서 레일마모의 데이터도 중요하다.

Ⅶ. 차륜과 레일의 단면형상

차륜과 레일의 단면형상은 나라별로 다양하게 적용되고 있다. UIC, ORE에서 제정하고 있는 단면형상도 있다.

차륜 단면형상에서 탈선계수에 직접 관련되는 필렛 부분의 각도에 대하여는 국내외 모두 60 도 내지 70 도이며, 플랜지 높이는 25 mm 내지 30 mm로 되어 있다. 또한, 레일의 게이지코너 부분의 반경은 10 mm 내지 13 mm의 수치로 되어 있다.

Ⅷ. 차륜/레일 간의 점착과 활주 · 공전현상

일반적인 활주 · 공전에 대하여는 여러 가지 형으로 정보가 나와 있으므로 여기서는 차륜 답면과 레일 두부상면의 점착성능에 대한 각종 요소의 영향에 대하여 기술한다.

1. 차륜과 레일 간의 전동접촉

차륜과 레일 간에 발생되는 작용력에는 윤하중, 구동력, 제동력, 횡력 등이 있다. 윤하중과 횡압은 차량이 선로 상에 있는 한, 상시 발생되고 있는 힘이며 구동력과 제동력은 가속이나 감속하려고 할 때에 차륜과 레일 간에 작용하는 힘이다. 이 힘은 일반적으로 그림 3에 나타낸 특성(점착력 특성)을 갖고 있으며 크리프 특성이라고도 불리고 있다. 이 그림의 종축은 접선력과 수직하중인 윤하중의 비(접선력 계수 또는 traction계수)이며, 횡축(미끄럼 율)은 차륜의 원주 속도와 차륜의 이동속도의 차이(미끄럼 량)와 양자의 평균속도의 비를 나타내고 있다. 그림에서 곡선의 최대치를 점착계수라고 정의하고 있으며, 그 때의 미끄럼 율보다도 큰 영역을 거시(巨視) 미끄럼 영역, 작은 영역을 미소(微小) 미끄럼 영역(크리프 영역)이라고 부르고 있다. 점착계수의 값은 그 순간의 속도, 차륜과 레일의 표면상태, 양자의 사이에 개재하고 있는 물질(물, 산화물 등), 진동조건 등에 따라 변화된다. 지금까지 얻어진 점착계수의 실효치는 고속으로 됨에 따라서 저하되어 있고 속도와의 관계를 수식으로 표현하고 있는 것이 일반적이다.

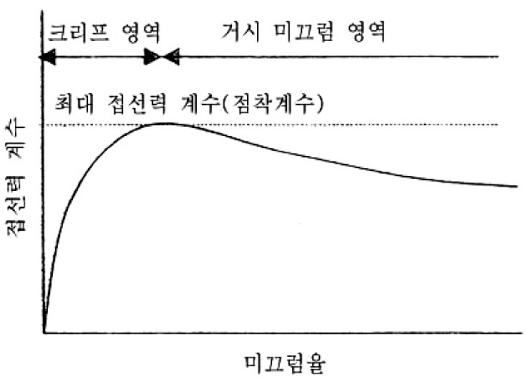

그림 3. 일반적인 차륜/레일 간의 점착력 특성

2. 점착계수

점착계수를 이해하기 위해서는 차륜과 레일이 전동 접촉되어 있는 미소한 부분의 상황을 알 필요가 있다. 그림 4(1)은 접촉영역에서의 접촉압력(윤하중에 상당)을 나타내고 있으며, 접촉영역 중심부의 접촉압력이 최대로 되어 있다. 이 상태에서 차륜에 가속토크를 주면, 접촉면에서는 접선응력이 작용하게 된다. 그림 4(2)는 일정한 토크가 주

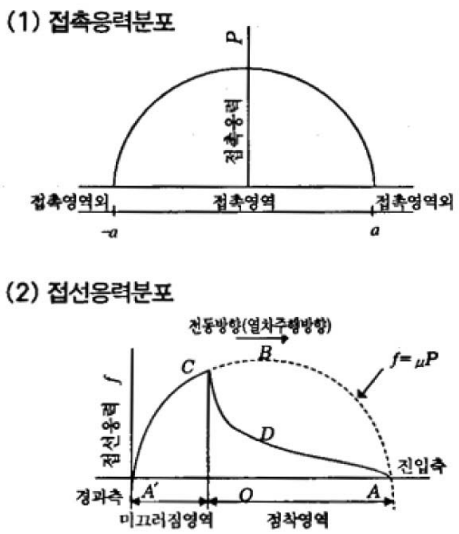

그림 4. Cater의 2차원 응력분포

어지고 있는 상태이지만, 토크를 제로로부터 증가시켜 가면 미끄럼 율은 차차로 증대되어감과 함께 그림의 미끄럼 영역이 차차로 증대하고 점착영역은 차차로 감소되는 것으로 되어 그림의 C점이 A' 점에서 B점의 방향으로 이동하며, 최종적(A점)으로는 점착영역이 없게 되고 모두가 미끄럼 영역으로 되어 점착력계수가 최대(점착계수)로 된다. 이 상태에서 더욱 미끄럼 율이 증가된 상태에서는 동(動)마찰력으로 지배되는 상태로 된다.

이 전동접촉에 따라 차륜, 레일의 양자에 미크로적인 소성변형이 생김과 함께 피로가 축적되는 것으로 된다.

3. 점착에 관한 최근의 연구사례

(1) 마찰계수

레일표면 마찰계수 측정기를 이용하여 레일표면의 마찰계수를 측정한 사례에 따르면, 실제의 차륜/레일 간의 (동)마찰계수의 값은 상기의 측정기로 계측한 결과의 0.8배 정도이었다. 동일한 측정기를 사용하여 사용 환경조건이 다른 각 개소의 레일표면 마찰계수를 측정한 결과에서는

- 전철화 구간과 비교하면 비전철화 구간의 마찰계수가 낮다(디젤열차로부터의 배연 등이 기름환경을 구성)
- 열차빈도가 높은 선구일수록 마찰계수가 높다(1 시간당의 통과축수 50 축을 경계로 한 분석결과)는 것이 분석되었다.

그렇지만, 마찰계수에 관한 직접적인 영향인자는 미크로적인 차륜 · 레일의 표면형상, 접촉면에 형성되는 산화막이나 산화물 등과 접촉면에 개재하는 물질의 성상이었기 때문에 다음의 항에서는 이에 관한 내용을 소개한다.

(2) 레일표면 산화물의 영향

염수환경 터널에서 차륜의 롤 슬립(roll slip)이라 불리는 거시 미끄럼을 일으키지 않을 정도의 종(縱)미끄럼의 진동으로 인하여 발생된다고 생각되는 레일 파상마모가 발생되고 있다. 이 발생 메커니즘을 해명하기 위하여 거의 동일한 선형을 갖고 있고 롤 슬립이 발생되고 있다고 상정되기는 하나 파상마모는 발생되지 않고 있는 산악터널과 염수환경 터널의 레일표면 부착물을 채취하여 X선 분석을 한 사례의 결과에서는 염수환경 터널의 부착물에서만 마찰계수가 저하되는 β-수산화철(FeOOH)이 검출되었다. 또한, 레일표면의 산화정도도 격렬하고 마모진행도 크다고 생각되며, β-수산화철의 검출은 향후의 상기 파상마모의 발생 메커니즘을 검증하는 유효한 실마리로 될 것이다.

(3) 수온의 영향

물 윤활상태에서의 점착력의 거동에 대하여 많은 연구가 있으며, 수막이 두꺼운 쪽이 점착계수가 저하되는 점, 수온이 높은 쪽이 물의 점성이 저하되어 접촉 간의 수막두께가 얇게 되어 점착계수가 크게 되는 점이 확인되고 있다.

Ⅸ. 궤도회로 단락불량

신호회로에는 여러 가지 방식이 사용되고 있고 레일을 회로로 하지 않는 방식도 있지만, 현 시점에서는 레일을 신호회로로서 사용하고 있는 궤도회로방식이 주체이며, 이 방식의 경우에는 차륜과 차축으로 좌우의 레일이 전기적으로 단락되는 것을 전제로 하여 시스템이 구성되어 있다. 따라서 차륜과 레일의 접촉부분이 이물질로 절연되어 궤도회로가 단락될 수 없는 경우에는 신호시스템으로서는 '차량부재' 로 인식되기 때문에 당해구간에 다른 열차가 진입할 위험성이 잠재한다. 이와 같은 경우를 상정하여 예를 들어 열차번호 추적시스템과 같이 열차의 존재를 연속적으로 추적(follow)함으로써 알람을 발생시키는 구조도 설치되고 있다.

정상의 궤도단락 상태에서는 열차가 당해 궤도회로구간에 들어감과 함께 잔류전압이 저하되어 있기 때문에 신호시스템은 '열차 있음' 의 상태로 된다. 이에 대하여 단락이 나쁜 상태에서는 궤도회로의 단락상태가 불안정하게 되어 있으므로 신호시스템으로서의 '열차 있음' 조건이 반드시 설정되지 않는다.

이 궤도회로 단락은 표 2에 나타낸 것과 같은 인자가 영향을 주고 있으며, 레일이나 차륜의 표면 산화물이나 비래(飛來)물질과 같은 이물질의 부착이 발생된 경우에는 '오염의 두께' 로 평가되며, 표면 거칠기가 거칠수록 궤도회로가 단락되기 쉽게 된다. 윤하중도 마찬가지로 큰 쪽이 단락되기 쉽게 된다.

또한, 궤도회로 전압은 큰 쪽이 절연피막을 파괴하기 쉽게 하기 때문에 단락저항을 저하시킨다. 귀선전류가 있는 것은 차륜과 레일 간에 전류가 흐르게 되어 절연피막이 파

표 2. 단락감도에 영향을 주는 인자의 성상

얇다	←	표면의 오염두께	→	두껍다
거칠다	←	표면 거칠기	→	매끄럽다
크다	←	윤하중	→	작다
대(大)	←	궤도회로 전압	→	소(小)
있음	←	귀선전류	→	없음
소(小)	←	단락 저항	→	대(大)

괴되게 된다.

대책으로서는 신호시스템에서의 고감도 특수 궤도계전기 방식, 고감도 단락펄스 궤도회로 방식 등이 실용화되어 있다. 레일 측에서의 대책으로서는 차량기지 구내선로 등에서는 레일 상에 홈을 파서 황동 등의 녹슬기 어려운 금속을 채우는 방식이 있다. 차량 측의 대책으로서는 시험의 단계뿐이지만 전기적으로 절연피막을 파괴하는 방법도 검토되고 있다. 또한, 차륜 답면의 오손물질을 제거하는 방식으로서 답면 청소장치를 이용하는 수단도 단락감도 향상의 한 방법이다.

Ⅹ. 맺음말

철도에는 많은 기술경계가 존재하지만, 그 중에서도 전형적인 경계문제로서의 차륜 · 레일 문제에 대하여는 세계적으로 여러 가지 기계공학계열이나 토목공학계열의 전문가에 의한 합동검토의 장이 설정되어 의논되어 왔다. 차륜 · 레일의 접촉에 관한 국제회의도 개최되고 있는 것처럼 차륜 · 레일 문제의 중요성이 인식되어 있다.

본고에서는 철도의 3대 사고(탈선, 전복, 충돌)에 대하여 표 1과 같이 정리하여 주요한 항목에 대하여 현상과 향후에 대하여 기술하였다.

향후에도 사람이나 물자의 이동이 계속되는 한, 철도수송이 지금까지 이상으로 시장점유율을 확대하여 발전하는 것은 인류에게 중요한 것으로 인식되고 있다. 이 때문에 철도에서 안전과 안심을 유지 향상시키기 위하여 필수의 과제인 차륜 · 레일 간의 과제를 이해, 해결하는 데에 본고가 일조하기를 기대한다.