

구 병 춘 한국철도기술연구원 신교통연구본부 책임연구원 | e-mail : bcgoo@krii.re.kr

이 글에서는 철도산업 분야에 사용되는 재료 및 파괴역학 관련 최근 동향을 요약 정리하였다.

이 글에서는 철도산업에서 연구 혹은 실용화가 되고 있는 최근의 재료와 파괴역학 관련 기술에 대해 소개하고자 한다. 인류의 역사를 구석기, 신석기, 청동기, 철기 시대와 같이 재료 관점으로 분류할 수 있듯이 기술발전은 재료의 발전과 밀접한 관련이 있다. 철도산업의 발전도 예외가 아니며 재료기술의 향상에 크게 의존하여 오고 있다. 차량의 속도향상은 경량화에 더해 점착성능, 제동성능, 집전성능의 향상, 기타 부재의 성능향상 등의 요소기술이 필요한데, 어느 것이나 재료 자체의 개발, 가공기술의 진보, 신뢰성의 확보가 매우 중요하기 때문이다. 따라서 재료는 철도의 핵심기술의 하나로 인식되고 있다. 한편 철도 운송은 안전성을 전제로 하므로, 현재 이미 사용 중인 재료의 수명연장, 기능향상, 사용에 따라 발생하는 구조물의 열화판정, 유지보수 저감 등 철도사업자의 요구에 적절히 응할 필요가 있다.

철도용 재료의 최신 연구동향

▶ 고온 초전도체 및 전력 케이블

전기저항이 영인 초전도 재료에 관한 재료의 합성, 평가, 벌크재 및 선재의 가공 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 재료 개발의 측면에서는 이트륨계 벌크재에 불순물로 아연 원소를 첨가하여 포착 자장값을 향상시키고, 벌크재에 수지를 함침시켜 보강하여 기계강도 개선, 열

화방지, 성능과 기능을 향상시킨다. 그리고 생산성 향상, 생산비 절감에 대한 연구도 시행되고 있다. 초전도체의 철도 적용으로 초전도 케이블을 철도의 송전선에 적용하는 것을 목표로 연구 개발이 이루어지고 있다.

▶ 마그네슘 합금

차체의 경량화는 차량의 운행에너지 저감, 이산화탄소 배출량 감소 등을 위해 필요한 기술의 하나이다. 현재까지 경량화 재료로 알루미늄이 많이 적용되어 왔다. 마그네슘은 실용금속 중에서 비중이 매우 낮아 경량화 효과가 현저하나 발화점이 낮으므로 이를 높이기 위해 갈슘 등을 첨가한 난연성 마그네슘에 대한 연구가 진행되고 있다. 기본적인 특성, 접합성 등 아직 규명하여야 할 것이 많다.

▶ 탄소/탄소 복합재

탄소 기지에 탄소섬유를 보강재로 한 탄소/탄소 복합재는 항공기, 자동차 등에 제동마찰재로 많이 활용되고 있다. 여기에 구리합금을 함침시켜 만든 철도차량 습관은 경량이면서 종래 사용되던 카본계 습관보다 파괴인성이 크고, 금속계 습관보다 장착이 쉬워 사용이 확대되고 있다. 탄소섬유의 사용에 의한 높은 원가에 대한 대책으로 마모 특성을 향상시켜 수명을 연장하여 생애주기 비용을 낮추어 이에 대응하고 있다.

▶ 압전고무

압전고무는 전기에너지와 기계에너지를 가역적으로 변환이 가능한 세라믹 압전재료를 고무와 혼합하여 고무의 유연성을 갖게 한 재료이다. 단순한 혼합은 압전성을 저하시키므로 압전재료가 방향성을 갖게 성형하여 사용한다.

▶ 비 할로겐 소재 사면 방호 시트

철도에서는 잡초 방지, 사면보호를 위해 방호 시트를 적용하고 있다. 그런데 근래에는 환경 보전을 위해 폐기 후 소각 시 유해물질의 발생이 우려되어 새로운 소재의 개발이 요구되는데 이에 대한 대책으로 비 할로겐 소재에 의한 고분자계의 사면 방호 시트가 개발되어 적용되고 있다.

▶ 구동장치 기어 윤활유

열차가 고속화됨에 따라 기어의 물림부나 구동장치 베어링의 윤활유는 온도가 상승되므로 내열성이 높은 합성오일의 개발이 필요하다. 근래에는 구동장치의 검사주기를 연장시키기 위해 합성오일 중에서도 내산화성이 높은 오일이 요구된다. 60만 km의 주행에도 교환이 필요 없는 기어 오일이 사용되고 있다.

▶ 합금 주철 제륜자

주철 제륜자는 다른 제륜자에 비해 수분이 있는 경우나 저온에서도 마찰계수의 저하가 작아 많이 사용되고 있다. 고속차량에서는 니켈, 몰리브덴과 같은 합금 원소를 혼합한 합금주철 제륜자가 사용되는데, 희귀 금속인 니켈과 몰리브덴의 함유량을 줄이고 대신 세라믹 붕을 삽입한 합금 주철 제륜자가 우수한 성능을 가지는 것이 확인 되었다.

▶ 지오 폴리머 침묵

화력 발전소 등에서 생성되는 석탄재와 알카리 용액을 혼합하여 경화한 지오 폴리머 경화체는 시멘트 콘크리트와 유사한 외관을 갖고, 시멘트 콘크리트의 열화

요인인 알카리 반응, 산 열화, 화재 등에 대해 내성이 높아 지금까지 시멘트 콘크리트가 사용되지 않은 곳에 적용 가능성이 있다.

▶ 궤도 패드

최근 철도 노선 주변의 도시화, 열차의 고속화에 따라 진동저감을 위해 낮은 스프링 계수를 갖는 궤도 패드가 사용되는 경우가 많다. 이러한 소재에 사용되는 합성 고분자계 소재는 탄성률 등의 물성이 온도에 의존하는 특성을 보이므로, 저온 시에 기대되는 진동성능을 맞추기 어렵다. 따라서 넓은 온도 범위에 걸쳐 요구되는 탄성률을 발휘하는 고무의 개발이 요구되고 있다.

철도에서의 파괴역학

철도에서의 파괴역학은 차축, 차륜, 교량, 등에서 널리 적용되고 있다. 본 글에서는 차축, 차륜, 레일과 관련된 파괴역학에 대해 간략히 정리하였다.

▶ 차 축

전통적으로 철도차량 차축은 재료의 내구한도를 기준으로 하여 무한수명을 갖도록 설계되고 있다. 실제로 현장에서 소수의 차축이 파손되므로 이러한 접근법은 타당하다고 할 수 있다. 종종 차축의 피로크랙은 압입부에서 발생하고 있다. 차축에서 발생한 초기 크랙의 성장률은 매우 느리다고 알려져 있다. 크랙이 감시 가능한 수준까지 성장하는 데는 4×10^8 사이클 혹은 1.5×10^6 km 정도의 주행이 필요하다. 크랙이 어느 정도 크기에 도달하면 더 빨리 진전하지만 여전히 손상허용개념을 적용할 수 있을 정도로 느린 속도로 진전한다. 압입부 외에도 차축 반경이 달라지는 플랜지 부위와 차축의 중앙에서 파손이 일어나는 경우도 있다. 철도차량에서는 1950년대 이후로 초음파, 자분탐상, 와전류 등을 이용한 비파괴검사를 실시하고 있다. 일본 신간선 차축은 매 30,000km 정기검사마다 균열검사를 하고, 450,000km마다 대차 검사 시, 그리고 900,000km 전반검수 시 균열검사를 한다.

정기검사 시 차축은 대차에 장착된 상태이다. 초음파 탐상은 중실축의 경우는 수직조사법을 적용하고, 중공축의 경우는 사각조사법을 사용한다. 대차 및 일반 검사의 경우는 대차로부터 분해하여 실시한다. 모든 차축은 자분탐상법에 의해 검사된다. 독일 DB에서는 초음파 탐상에 의해 잠재적인 결함이 발견되면 자분탐상을 보충적으로 실시하고 있다. 파괴역학은 차축에 존재하는 혹은 검수에 의해 발견한 균열이 다음 번 검수까지 얼마나 진전할지, 혹은 크랙의 진전 길이를 계산하여 검수주기를 얼마로 설정할 것인지 등에 활용되고 있다.

▶ 차 룬

차륜에서의 피로크랙 성장은 박리와 같은 차륜의 일부 손실이나 크랙의 급격한 성장에 의한 차륜과 차축의 분리에 이를 수 있다. 차륜에서의 균열발생은 답면제동과 디스크제동에 따라 달라진다. 답면제동의 경우 표면 크랙의 생성은 주로 되풀이 열 하중에 의해 발생한다. 차륜답면은 브레이크 슈와의 마찰에 의해 반복적인 열 하중을 받게 된다. 가열은 차륜답면에서 균일하게 발생하지 않고 국부적으로 열반점에서 급격히 온도가 상승하여 500~800℃까지도 상승한다. 가열된 차륜은 레일과의 접촉과 전달에 의해 급격히 냉각되어 차륜 림에 잔류응력을 생성시킨다. 그리고 가열은 차륜을 국부적으로 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변환을 일으켜 약 0.5%의 체적상승을 유발하는데 이것도 잔류응력을 생성시킨다. 이러한 잔류응력은 휠-레일 구름접촉과 결합되어 차륜에 균열을 발생시킨다. 이렇게 생성된 작은 표면 균열은 마모에 의해 대부분 없어지지만 몇 개는 성장할 수 있다.

답면제동을 사용하는 차륜과 달리 디스크 제동을 사용하는 차량의 차륜에서 표면균열은 높은 견인력이 균열발생의 주된 요인이다. 접촉영역에서 소성변형이 생기고 잔류응력과 가공경화를 유발한다. 높은 하중에서는 소성변형이 계속하여 축적되어 재료의 연성한도를 초과하게 되어 균열이 발생하게 되는데 이를 라체팅이라 한다.

표면 아래 3~5mm에서도 균열이 발생하는데 이는 전단력과 비금속 개재물에 의해 발생한다. 이 위치는 탄성해석을 할 때 전단력이 가장 큰 위치이다. 표면 크랙과 표면 아래 크랙은 차륜 표면과 평행하거나 약간의 각도를 갖고 진전하다가 표면쪽으로 혹은 깊이 방향으로 진전 방향을 바꾸어 진전한다. 표면 아래 크랙이 잠재적으로 더 위험하다고 할 수 있다.

지금까지 구름접촉피로에 대한 연구는 주로 크랙의 발생에 관한 것이었다. 차륜의 구름접촉피로에 파괴역학을 적용하고자 할 때는 여러 가지 문제와 직면하게 된다.

- 한 점에서의 응력상태가 다축이며 위상이 변화한다.
- 크랙의 전파는 주로 모두 II와 III에 의해 진행된다.
- 크랙 사이의 마찰이 크랙의 전파에 중요한 역할을 하는데 이를 정량적으로 평가하기가 쉽지 않다.
- 간헐적인 과부하가 크랙 진전을 가속시키는데 기존의 모델은 이를 기술할 수 있기에 충분하지 않다.
- 균열을 성장시키기 위해서는 큰 하중이 필요하고 이는 크랙 선단에서 큰 소성역을 생기게 한다. 큰 소성역은 일반적으로 사용되는 응력확대계수의 사용에 의문을 제기하게 된다.

UIC와 prEN 13262에서는 파괴인성치가 일정한 값 이하일 때에만 파손이 발생한다는 경험적 사실로부터 파괴인성치를 표 1과 같이 규정하고 있다.

표 1 Required minimum fracture toughness for railway wheels according to UIC 813-3 and pREN 13262

Steel grade	Required fracture toughness, $\text{Mpa}\sqrt{m}$	
	Minimum value out of 6 tests	Average value out of 6 tests
R6	80	100
R7	70	80
R8	50	60

▶ 레 일

레일의 피로 및 파괴현상은 레일이 직선이나 곡선이나, 운행이 한 방향으로만 하는지 혹은 양 방향으로 하는지, 용접부의 유무, 분기기 그리고 복잡한 하중, 계절

별 환경적 변화 등 많은 인자로 인해 대단히 복잡하다. 레일에서도 주변의 온도변화에 의한, 레일의 신축에 의한 잔류응력과 제작시의 잔류응력 그리고 휠-레일 접촉에 의한 잔류응력의 변화 등이 피로파괴에 큰 영향을 미친다.

레일에 발생하는 대표적인 결함의 유형은 다음과 같다.

- Shellings : 게이지 코너의 표면 아래 크랙이 진전하여 떨어져 나가는 현상으로 곡선부 외측레일에서 주로 발생한다.
- Squats : 주로 직선레일에서 발생하며 작은 표면 크랙으로부터 소량의 금속이 떨어져 나가는 현상
- Head checks : 0.5~0.7mm 간격으로 게이지 코너에서 발생하는 미세한 크랙군으로 레일 표면의 냉간 가공경화에 의해 발생한다. 종종 한 방향으로 운행되는 곡선부 외측레일에서 발생하며, 때때로 양 방향으로 운행되는 직선부에서도 발생한다.
- Transverse cracks : Shellings, squats, head checks 그리고 다른 결함들이 횡방향 크랙으로 진전하는 경우이다. 이러한 결함은 모든 레일에서 발생하며 특히 오래된 레일에서 발생하기 쉽다.
- 용접부에서 발생한 Transverse cracks : 횡방향 크랙과 같지만 용접부 기공, 개재물 등에서 발생한 크랙이다. 종종 큰 인장 잔류응력이 작용하는 부분에서 발생한다.

‘Kidney’ 혹은 detail 크랙에 대한 파괴역학은 지난 20여 년 이상 연구되고 있다. 대기 온도가 임계 균열 크기와 잔존수명에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

표면 크랙의 모델링은 혼합 모드하중, 크랙 면간의 마찰, 유체의 간힘 현상, 다축 하중 등 여러 변수로 인해 매우 복잡하다. 매우 짧은 크랙은 탄소성 파괴역학 혹은 손상역학을 적용하여 모델링 할 수 있다.

표 2 Required minimum fracture toughness for rails according to pREN 13674-1

Steel grade	Required fracture toughness, $Mpa\sqrt{m}$	
	Minimum value out of (min) 5 tests	Average value out of (min) 5 tests
200 and 220	30	35
260 and 260 Mn	26	29
320 Cr	24	26
350 HT	30	32
350 LHT	26	29

긴 크랙에 대해서도 여전히 많은 문제가 있다. 이 중 하나는 하중의 위상이 다르고 주응력의 방향이 변한다는 것이다.

열과 잔류응력에 의한 정적인 응력에 차륜의 이동에 의한 동적인 응력이 중첩되어 균열선단은 초기에 모드 I 에서 차륜이 크랙 위를 지날 때 모드 II가 되고 사이클이 끝날 무렵에는 모드 III을 경험하게 된다. 모드 I 하중은 크랙을 진전시키기에는 너무 작다. 모드 II 응력은 상당히 크며 지배적인 모드가 된다. 운할도 혼합 모드에서의 크랙의 성장에 중요한 역할을 한다. 레일의 피로 파괴에서 아직도 만족스럽지 못한 성과는 위상이 다른 모드 I 과 II가 작용할 때 언제 크랙이 분기하느냐이다.

현재 철도레일의 파괴인성치에 대한 기준은 준비 중에 있으며 표 2와 같다.

레일의 비파괴 검사는 주로 초음파와 와전류를 이용한 방법이 사용되고 있다. 레일의 용접부와 분기기에서의 결함탐상은 아직 많은 문제를 갖고 있다. 레일의 유지보수에서는 삭정이 중요한 역할을 하지만 최적의 삭정량이 얼마나 되어야 할지에 대해 파괴역학이 해답을 줄 수도 있을 것이다.