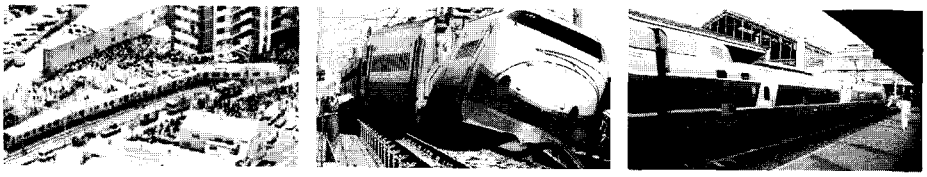


철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발

유원희 >>
한국철도기술연구원 책임연구원

김만철 >>
한국철도기술연구원 선임연구원

1. 서 론

철도의 장점은 다른 육상교통수단에 비하여 많은 여객을 안전하게, 정시에 맞춰 수송한다는 것이다. 아울러 최근에는 고속철도의 발달과 함께 빠르게 수송한다는 것이 추가되었다. 그러나 운행속도가 빠르고, 대량으로 수송하는 만큼 안전사고에 대한 대책이 따르지 않으면 철도는 무용지물이 되고 말 것이다.

국내, 국외를 막론하고 철도사고의 대부분은 열차의 탈선과 직결되어 있을 뿐 아니라 탈선사고 발생 시 전복 및 열차충돌 등을 동반한 대형사고로 발전될 수 있기 때문에 열차의 안전 확보를 위해 가장 중요하게 다루어져야 할 인자로 판단되고 있다. 탈선의 주요 인자로는 차량 및 궤도의 결함뿐만 아니라 지진이나 강풍 등 열차에 직접적인 동적인 힘을 주는 자연요인도 존재한다. 따라서 국내의 열차안전성을 극대화하기 위해서는 차량/궤도의 결함과 자연재해에 의한 요인을 포함하여 우리의 철도환경에서에 맞는 종합적인 탈선 안전도를 평가함과 동시에 방지대책 수립을 가능케 하는 체계적인 기술 및 장비의 확보가 필수적이다.

2005년도 한국철도공사의 "재난관리업무 추진계획"자료를 분석한 결과('99~'04)에 따르면 열차충

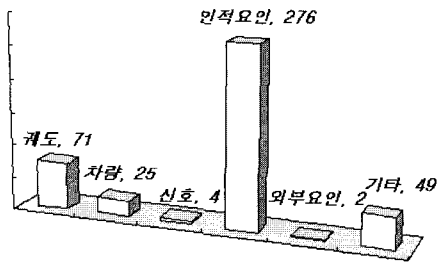


그림 1. 열차 및 차량 탈선 원인 분석

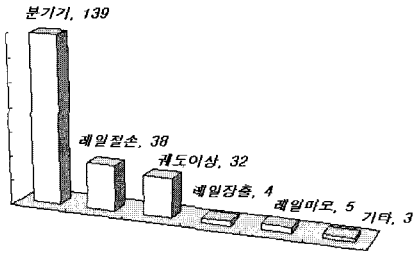


그림 2. 철도사고 궤도요인별 분석

돌이 3건, 열차탈선이 20건으로 열차사고 대부분이 열차탈선에 집중되어 있다. 한편, 열차 및 차량의 탈선에 대한 원인 분석결과 인적요인을 제외하고는 궤도 및 차량의 결함이 주요인으로 나타나고 있으며, 궤도에 관련된 탈선사고는 주로 분기기에서 발생하고 있다(그림 1, 2).

한편, 2005년 4월 25일 수백 여 명의 인명피해가 발생한 일본의 효고현 열차탈선사고(그림 3)는 규정속도를 무시하고 과속으로 주행하던 열차가 곡선부가 시작되는 지점에서 탈선한 경우로서 차륜/레일 사이의 인터페이스 및 속도, 그리고 곡선부 및 완화곡선부의 문제가 탈선에 심각한 영향을 준다는 것을 알게 해주었다.

또한, 2004년 10월 23일 일본 니가타현에서 발생한 진도 6.8의 지진에 의한 신칸센열차의 탈선(그림 4)은 지진의 빈도가 점차 많아져가는 우리나라에도 시사하는 바가 매우 크며, 이를 통하여 지진이나 강풍 또는 혹서기와 같은 자연요인에 의한 탈선에 대비

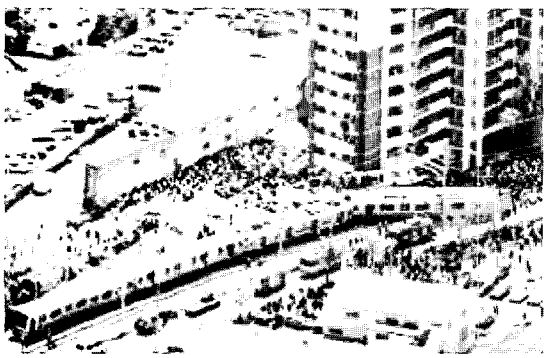


그림 3. 일본 효고현 열차탈선 장면

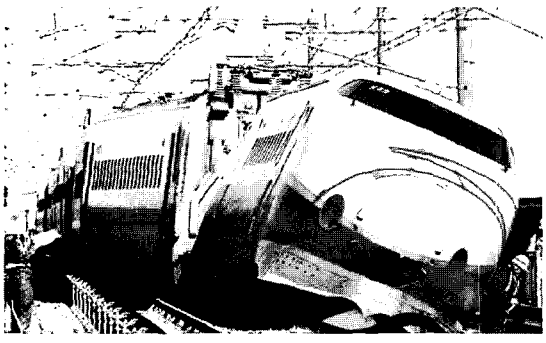


그림 4. 일본 니카타현 신칸센 열차 탈선 장면

할 수 있는 방안을 세워야 함을 알 수 있다.

2. 탈선 관련 기술개발 동향

2.1 국내 기술개발 동향

철도차량의 탈선에 대한 연구는 탈선사고의 원인규명, 사고방지기술 및 피해 경감을 위한 핵심기술 확보에 초점이 맞추어져야 하지만, 국내에서는 단순한 현장 측정에 의한 사고분석을 하는 초보적인 상태로, 그 기반기술이 매우 취약한 실정이다. 특히 KTX 개통과 더불어 고속화에 따라 차량의 탈선에 대한 안전성 확보를 위한 노력이 증대되고 있으나, 외국의 관련 시스템 및 규준 등을 그대로 도입 적용하고 있어 국내 기술은 아직 초보적이라 할 수 있다. 즉, 탈선에 대한 기반기술이 확보되지 않은 상태이기 때문에 시스템 오류 시 이를 즉각적으로 대처할 수 있는 능력이 떨어지게 됨은 물론, 도입된 기술을 우리나라의 다양한 철도시스템에 적용하는데 어려움을 겪고 있는 것이 사실이다.

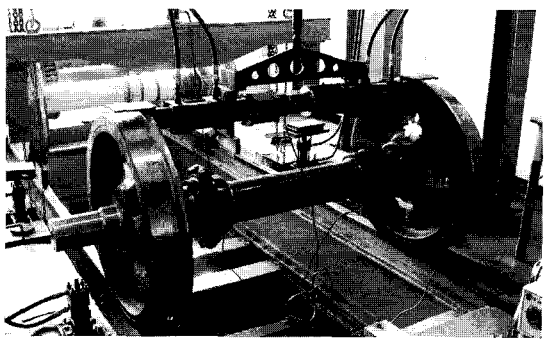
차량/궤도 결함에 따른 탈선 분야의 경우 구름접촉 피로 손상에 관한 국내 연구는 미미한 실정으로서 기술수준이 선진국의 절반이하의 수준으로 보고 있다. 반면, 차륜답면형상에 의한 차량안정성 문제는 고속철도의 운용으로 시운전 단계에서 그 중요성이 크게 인식되어 한국철도기술연구원을 중심으로 차륜답면에 대한 동특성 해석 및 시험평가 연구가 진행되었으며, 그에 따라 차륜답면형상의 분석, 설계, 해석 및 시험기술 일부는 보유하고 있다고 판단된다. 그러나 단기간의 현안 문제에 한정된 연구로 연속성이 미흡하여 그 기술에 한계가 있으며 고속철도차량 유지보수의 자립기술 확보, 틸팅차량 등 신조 고속차량의 개발 운용을 앞둔 현재 플랜지 마모로 인한 차량탈선 위험에 관한 연구 등은 시급한 사항이라 할 수 있다. 또한, 차륜관리 유지보수기준은 기존철도의 차륜관리 범위에 한정되어 있는 상황으로서, 주된 여객수송차

량인 고속철도에 대한 차륜관리기준에 까지 확대 적용하기엔 미흡한 실정이다. 한편, 곡선부 및 완화곡선부에서의 철도차량의 동적 거동에 관한 연구는 틸팅차량을 개발하는 철도기술연구개발사업에서 일부 다루어졌으나, 이는 틸팅메카니즘의 성능을 확보하기 위한 것으로서 탈선에 관련된 상세한 연구는 시행되지 않은 상황이며, 분기기의 경우에도 속도향상을 위한 방안으로서 분기기 형상에 따른 차량의 동적거동에 관한 연구가 일부 수행되어 있으나 탈선현상의 규명이나 안전성확보의 문제는 다루어지지 않은 상태이다. 또한, 기존의 탄성 분기기에서는 고정 크로싱부의 결손부에 대한 주행 안전성 문제로 최고 130km/h로 이하로 분기기 통과 속도를 제한하고 있으며, 연결선 구간에 부설된 고속분기기의 경우 부설 초기에 텅레일부에 급격한 마모가 발생하였으나 이를 개선하여 주행안전성 향상시키는데 기술적 한계를 가지고 있다.

자연요인과 관련된 탈선 연구사례는 국내에서는 거의 없는 것으로 파악되고 있다. 지진 분야의 경우 내진관련 연구와 연계하여 구조물 동적평가 기술은 상당부분 진척되어 있으나, 이를 주행열차의 주행안정성 및 안전대책과 연계하는 부분에 대한 연구는 진행된 사례가 없으며, 그나마 검토가 이루어진 영종대교의 경우 전적으로 외국기술진에 의존하였다. 한편, 강풍에 의한 탈선위험에 대해 국내에서는 2001년 처음으로 G7 고속전철기술개발사업 내에서 한국형 고속철도차량의 6량 모델에 대해 바람에 대한 동적안전성에 대한 분석연구가 이루어졌으나, 이 연구는 동력학적 해석을 통해 동적 안정성을 검토하는 과정에서 강풍 시 차체에 가해지는 측력을 바람속도에 해당하는 동압으로 가정하여 연구한 것으로서 전복의 문제, 운전규제기준 등을 고려한 구체적인 연구는 이루어지지 않았다. 한편, 혹서기 장대레일 장출 위험과 관련하여 궤도 좌굴에 관한 모델과 프로그램을 개발하고 있으나 궤도의 각종 불확실성을 고려하지 못하고 있어 현장적용에 어려움을 겪고 있다.

탈선안전도 시험평가기술에 있어서 국내에서는 한국철도기술연구원에서 유일하게 철도차량의 탈선계수 측정을 위한 윤축을 개발하여 주행안전성을 평가한 경험과 실적을 보유하고 있지만 연속법이 아닌 간헐법으로 측정하는 것이기 때문에 측정점들 사이의 하중이력들을 기록하지 못하고 있다. 자동차용으로는 다축 하중측정을 위한 센서가 개발되어 고가에 판매되고 있으나 하중용량과 부착방법 등이 철도차량과는 판이하기 때문에 이를 적용하는데 어려움을 겪고 있다. 또한 철도차량의 주행안전성에 관한 측정방법과 평가기준을 아직까지 규격으로 제정하지 못하고 있다. UIC 518에는 주행안전성과 관련하여 안전성, 궤도피로, 승차감 관점에서 동적성능시험과 평가에 관하여 일반적인 사항을 내용을 규정하고 있으나 우리나라에서는 UIC 코드에 의한 평가능력이 부족한 상태이며 세부지침 또한 마련되어 있지 않다. 따라서 국제표준의 시험절차와 평가기준 등을 제정하고 국제공인기관으로서의 주행안전성 평가기술 확보가 시급한 실정이다.

(a) 스트레인게이지 부착



(b) 정하중 시험

그림 5. 간헐법에 의한 탈선계수 측정방법

탈선안전도 시험평가시설의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 국내에서는 유일하게 대차동특성시험기가 2006년 말 한국철도기술연구원에 설치될 예정이나 대차의 동적거동 시험을 위한 전용시험기로서 차륜/레일 접촉에 의한 탈선메카니즘 분석 및 탈선안전도 시험평가를 수행하기에는 많은 제약이 있다.

탈선위험 모니터링시스템의 경우 국내에서는 아주 초보적인 수준의 축상베어링 온도 감시시스템을 적용한 경험이 있으나 그 성능에 문제가 있어 모두 철거한 상황으로서 철도차량의 탈선위험을 보다 정확히 검지하기 위한 실질적인 모니터링시스템이 필요한 상황이다. 특히 차륜이상 감지장치나 차량하부기기 결함 감지장치 등에 관한 국내 연구는 거의 없는 상황으로서 이 분야의 기술수준은 선진국 대비 절반 이하의 수준에 머무르고 있는 것으로 보고 있다. 또한, 궤도분야의 경우에도 예외는 아니어서 궤도 이상개소 감시경보시스템과 관련하여 프랑스의 고속선 궤도틀림기준 및 궤도이상개소 검지를 위한 대차진동 측정시스템을 도입하여 현재 고속선 유지관리에 적용하고 있으나 이와 관련된 기반 기술이 축적되어 있지 않아 운영상 많은 어려움이 있는 실정이다.

2.2 외국의 기술개발 동향

외국의 경우 탈선 주요 인자들에 대한 기반기술 연구를 수행하고 이를 기초로 탈선에 대한 안전성을 확보할 수 있는 시스템 및 운전규제기준을 정립하여 운영에 활용하고 있다.

① 차량/궤도 결함에 따른 탈선

차량/궤도 결함에 따른 탈선 분야의 경우 구름접촉피로손상으로 인한 크고 작은 사고가 계속적으로 발생함에 따라 차량의 안전성 향상을 위하여 차륜/레일재의 개발을 서두르고 있으며, 독일과 일본을 중심으로 초창기의 마모저항성 차륜재에서 더 나아가 균열발생이 어려운 RCF저항성 차륜재의 개발로 연구가 진행되고 있다. 독일 봄바디에서는 구름접촉피로손상에 대하여 재료적인 규격강화, 잠재적인 손상메커니즘 등에 관하여 연구하고 있으며 RCF의 균열은 Ratcheting에 의해서 발생한다고 보고하였다. 러시아 ARRRI에서는 차륜답면 경도의 변화에 따른 RCF의 손상에 관한 연구를 실시하였으며 RCF결함의 모델링과 차륜/레일의 접촉영역에 대한 온도특성평가에 대한 연구를 집중적으로 실시하고 있다. 또한, 캐나다에서는 소성변형에 의해 발생하는 미세 경사균열, 이른바 Ratcheting현상에 의한 균열발생 저감을 위하여 차륜답면 형상에 관한 연구를 실시하고 있다.

한편, 해외 고속철도 선진국에서는 차량의 안정성, 유지보수성 측면에서 오랜 운영경험과 축적된 데이터를 기반으로 효율적 차륜답면관리를 시행하고 있는데, 안정적 차량동적성능 확보를 위하여 차륜관리 분석기술 및 측정장비를 구축하고 있으며 각 국의 실정에 적합한 효율적인 차륜관리의 검수 기준을 도출하여 활용하고 있다. 분기기의 경우 프랑스에서는 분기궤도에서 160km/h를 초과하지 않는 한 기존선이나 고속선에서 가동 노즈크로싱을 사용하지 않고 일반 고정 크로싱을 사용하고 있을 정도로 분기기 통과시 열차에 대한 주행안전성을 확보하고 있다.

② 자연요인에 의한 탈선

자연요인에 의한 탈선 분야의 경우는 일본이 대표적인 예로서, 이미 지진조기경보시스템을 구축 운영하고 있으나 열차 주행 중 지진 발생 시 노반 및 선로구축물에 대한 거동 평가기술은 지속적으로 연구개발을 수행하고 있는 단계이며, 구조물에 대한 동적평가기술과 이를 조기경보시스템과 연계하는 연구를 RTRI 등에서 주도적으로 수행하고 있다. 중국 및 대만의 경우에도 대학을 중심으로 지진발생시 노반 및 선로구축물의 동적 거동 평가 기술을 연구하고 있다.

한편, 강풍에 의한 탈선의 경우, 1970년대 일본에서는 강한 측풍하에서 차량의 안전성 확보에 대한 방법을 목적으로 준정적 접근방법(Quasi-static approach)을 이용하여 한계측풍속도를 산출하는 연구가 수행되었으며, 같은 시기 영국에서는 APT

(advanced Passenger Train) 개발 과정에서 측풍에 대한 연구가 실시되었으며, 측풍에 대한 안전성 평가의 체계가 1978년 Gawthorpe R.G에 의해서 개략적으로 제안되었다. 또한 1980년대에 스웨덴에서는 틸팅 열차인 X2000 개발과정에서 서스펜션(suspension)의 동역학적 모사와 함께 선로의 불균일성이 고려된 동역학적 접근이 시도되었으며, 1990년대에는 고속철도로 인한 속도 증가와 차량의 에너지 효율 향상을 위한 차중 감소로 인해 유럽 전역에서 측풍으로 인한 사고의 위험이 부각되어 TRANSAERO Project를 중심으로 독일의 ICE2, 프랑스의 TGV등의 측풍 안전성 확보를 위하여 여러 연구가 수행되었다. 최근 유럽 및 일본을 중심으로 공기역학적인 연구 결과를 바탕으로 차량의 안전성을 평가하던 기존의 연구에서 나아가, 차량 동역학, 선로 구조물, 지형, 기상 그리고 차량 운용 및 위험도 평가를 통한 경보시스템 구축에 이르기까지 다양하고 광범위한 연구가 수행 중에 있다.

혹서기 장대레일 장출 위험의 경우 일본 JR에서는 혹서기 레일 온도에 따른 차량 주행안전성을 평가하여 열차 운행속도 규제 기준 정립하고 있으며, 미국의 경우에는 장대레일 궤도의 안정성 확보 기술을 확률론적 이론을 사용하여 그 신뢰성을 높이고자 연구를 진행하고 있으며 궤도 좌굴과 궤도 횡이동 평가기법을 개발하고 있다.

③ 탈선안전도 시험평가기술

탈선안전도 시험평가기술과 관련하여 일본철도총합연구소에서는 신간선에서의 탈선계수 측정을 위하여 특수 윤축을 개발하여 사용하였으나 하중간 연성이 발생하여 이를 이론적으로 보정하는 보정식을 사용하고 있다. 연속적인 수평압의 측정을 위한 실용화 연구가 계속되고 있으며 JIS를 통해 탈선계수 측정 및 분석방법에 대한 규정을 체계화시키고 있다. 독일의 Minden에 위치한 DB연구소에서도 탈선계수 및 하중이력 측정용 차축을 개발하여 측정하고 있으나 측정기술에 대해서는 극비로 취급하여 자세한 내용을 발표하지 않고 있고, 다만 측정용 차축을 판매하여 수익사업화 하고 있다. 이태리의 경우 최근 레이저 센서를 이용해 차륜에 가해지는 횡압 및 수평압을 측정하는 방법을 개발하고 있는데, 레이저를 이용한 방법은 그동안 noise에 의해 불가능할 것이라고 여겨지던 접근방법다. 한편, 우리나라에 고속전철을 보급한 프랑스는 SNCF에서 제작한 측정용 윤축을 국내에 운반하여 시험차량에 탑재하여 시운전에 사용하고 있으며 역시 그 내용에 대해서는 기술이전에 소극적인 태도를 보이고 있다.

탈선안전도 시험평가시설을 가장 많이 갖춘 나라는 일본으로서 RTRI의 경우 탈선 메카니즘 및 탈선현상 규명을 위한 각종 시험평가 설비 4가지를 갖추고 있으며, JR EAST의 경우에도 다량의 시험평가 설비를 갖추고 있다. 탈선사고 발생 시 시험평가 설비를 이용하여 탈선의 원인규명과 함께 탈선 현상을 동일하게 모사함으로서 탈선안전도에 대한 정확한 시험평가가 이루어지도록 하고 있다.

④ 탈선위험 모니터링시스템

탈선위험 모니터링시스템이 가장 많이 개발되고 있는 나라는 미국으로서 TTCI에서는 차륜의 찰상 및 결함을 감지할 수 있는 철도연변검지시스템(Wayside Inspection System)을 구축하고 있다. 독일에서는 Hegenscheidt-MFD 사에서 레이저를 이용한 차륜진단시스템인 ARGUS를 개발하여 판매하고 있다.

한편, 궤도 이상개소 감시경보시스템의 경우 프랑스의 SNCF(그림 6)에서는 차량의 고속주행 시 궤도 이상개소에 대한 대차 횡가속도와 탈선위험도의 상호 관계를 규명하여 유지보수기준 및 열차운전규제기준으로 정립하고 있으며, 미국 FRA에서는 고속으로 주행하는 차량의 탈선에 대한 안정성과 승차감 확보를 위하여 가속도 검측과 Neural Network를 이용하여 실시간으로 궤도이상개소와 차량의 상태를 검지할 수 있는 Onboard 시스템을 개발(그림 7), 1998년 Portland-Vancouver 구간과 Amtrak 등에서 성공적으로 시험운행을 완료하였다.

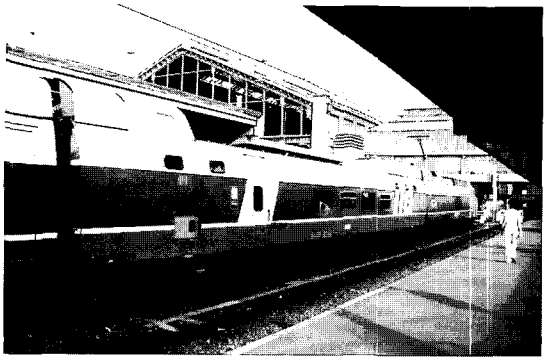


그림 6. 멜루진 검측차량(SNCF)

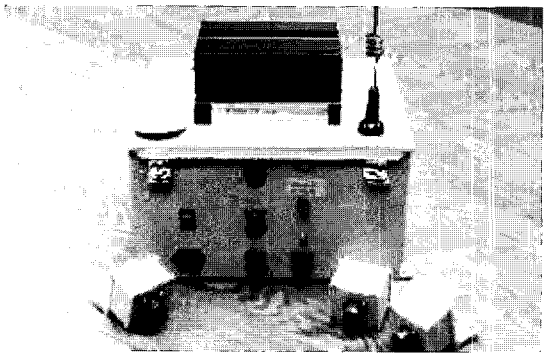


그림 7. Onboard 검측시스템(FRA)

3. 탈선사고방지를 위한 기술개발 분야

3.1 분야별 소요 기술

앞에서 살펴본 바와 같이 철도 선진국의 경우 고속화에 따른 주행안전성 향상 및 양질의 승차감 확보를 위하여 탈선사고 주요 요인들에 대한 대책 수립을 위해 최첨단 기술 들을 접목시키는 방향으로 연구를 수행하고 있다. 따라서 기존선 고속화 및 고속철도 운영을 이제 막 시작하고 있는 국내 철도환경을 고려할 때 탈선에 대한 안전성 확보를 위한 기반기술을 확보하는 것이 조속히 이루어져야 하며, 이를 통하여 이전의 기술 도입국에서 탈피하여 국내 철도시스템을 고려한 탈선사고 최소화를 위한 자체기술을 정립하여야 할 것이다.

차륜/레일 결함에 따른 탈선 분야의 경우 차륜과 레일의 구름접촉피로에 대한 현상은 아직까지 명확하게 이해되지 않은 사항이며 많은 변수가 작용하기 때문에 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 차륜과 레일의 구름접촉피로는 고전적인 피로해석 연구의 범주에서 해결되지 않은 사항이며 다축하중, 하중의 통계적 효과, 재료의 이방성, 재료적인 결함, 접촉형상 등을 고려하여 연구를 실시해야 한다. 차륜/레일의 경계영역은 복합적인 인자가 많이 작용하는 부분이며 결과적으로 탈선에 영향을 미치는 분야이기 때문에 각종 영향인자에 대한 연구가 중점적으로 수행되고 있다. 따라서 이에 대한 새로운 RCF 손상평가 기술이 개발되어야 할 것이다. ESIS(European Structural Integrity Society)에서는 구름접촉피로 손상평가와 방지대책 기술개발에 대한 지속적인 연구개발 투자를 하고 있으며 도출된 연구성과가 철도차량 안전성 향상에 기여하고 있다. 한편, 국내 차륜답면형상에 의한 차량안정성관련 연구는 일부 요소기술은 확보하고 있다고 할 수 있으나 고속철도관련 차륜답면관리기술은 프랑스의 기술을 답습하고 있는 수준으로 우리 실정에 적합한 기술개발및 기준 도출이 시급하다.

자연요인의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 우리 라의 경우에는 탈선안전도 평가기술이 전혀 연구되어 있지 않은 상황이다.

탈선안전도 시험평가기술 및 시험평가시설의 경우 철도선진국이면 모두 갖추고 있는 시설로서 차륜/레일 접촉에 의한 탈선현상 규명 및 시험평가기술의 개발을 위해 거의 상시 작동되고 있는 주요 설비이다. 결국 우리나라도 탈선안전도를 향상시키기 위해서는 이 설비의 확보가 필수적이다.

탈선위험 모니터링시스템에 있어서 차륜이상 감지장치는 철도차량의 안전성 확보에 중추적인 역할을 하고 있으며 해외에서는 사전에 차륜이상을 검지하는 시스템을 구축하고 활용하고 있다. 차륜이상 감지장치는 주로 레이저를 이용한 검지시스템이 연구되고 있으며 차상보다는 유지보수를 위한 정비창 입고 시에 차륜이상을 종합적으로 검사하는 시스템이 많다. 또한 차량하부에 장착된 기기들의 결함에 의한 탈선

의 위험이 종종 보고되고 있는 바, 정비창 입출고 시 차량하부 기기류의 결함에 대한 모니터링시스템이 필수적이다. 한편, 노반 및 선로구축물의 거동분석을 토대로 한 취약개소 평가기술 및 이를 지진 조기 경보시스템과 연계하는 연구는 전 세계적으로 시작단계에 있는 과업으로 국내에서도 이에 대한 독자 기술 확보가 시급히 요구된다.

3.2 탈선 관련 연구개발 내용

앞에서 살펴본 바와 같이 탈선위험에 관련되어 연구개발 되어야 할 내용이 매우 많다. 그러나 이 모든 것을 다 개발하기에는 너무 많은 예산이 필요하며, 어느 경우에는 중복의 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 우리나라에서 필요한 요소기술 중 우선적으로 개발되어야 할 기술들을 정리하면 다음과 같다. 이 기술들은 본 '철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발' 과제에서 연구개발 될 내용과 일치한다.

① 차량/궤도 결함에 따른 탈선안전도 평가 및 대책기술 개발
- 차륜/레일 접촉 메카니즘 규명 및 주행안전성 평가기술 개발
- 윤축 및 레일구름접촉 피로손상규명 및 방지대책 개발
- 곡선부 및 완화곡선부 탈선방지대책 수립
- 분기부 열차주행안전성 향상대책 수립
- 탈선방지를 위한 차륜플랜지 관리기술 개발

② 자연요인에 의한 탈선안전도 평가기술 개발
- 지진에 의한 열차주행안전성 평가기술 개발
- 강풍 시 차량전복위험 평가기술 개발
- 혹서기 장대레일 장출위험 평가

③ 탈선안전도 시험평가기술 개발 및 시험시설 구축
- 연속식 탈선계수 측정법에 의한 정확한 탈선계수 측정 및 탈선안전도 정의
- 탈선안전도 평가 시험시설 구축

④ 탈선위험 통합 모니터링시스템 개발
- 차량 결함 감시경보시스템
- 궤도 이상개소 감시경보시스템
- 레일절손 감시경보시스템
- 자연요인에 의한 탈선 감시경보기술

이상과 같이 탈선사고와 관련하여 사고의 원인을 정확히 규명하고, 그로부터 사고의 위험에 대한 정확한 평가를 시행함과 아울러 위험의 정도를 최대한 실시간으로 모니터링 하는 시스템이 필요하다. 본 연구과제가 종료되는 시점에는 어느 정도 이에 대한 기술이 개발되어 탈선사고 위험을 상당히 저감시킬 수 있는 초석을 이룰 수 있을 것으로 보인다. 그러나 철도차량의 탈선 문제는 단타성으로 해결할 수 있는 것이 아니다. 가까이 있는 세계 제 1의 철도안전 국가인 일본의 예를 보더라도 계속적인 철도안전에 대한 투자와 연구개발이 필요함을 인식해야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부(2005) "철도차량 안전기준 및 체계 구축(차량화재 안전기준 포함)", 철도종합안전기술개발사업 연구보고서
2. 건설교통부(2006) "철도차량 안전기준 및 체계 구축(차량화재 안전기준 포함)", 철도종합안전기술개발사업 연구보고서
3. "Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View their Dynamic Behavior – Safety – Track Fatigue – Ride Quality", UIC – 518, 2005.
4. "Derailment Mitigation – Categorization of Past Derailments", Research Program – Engineering, Rail Safety & Standards Board, England, 2004.