

철도차량의 충돌안전도 설계를 위한 사고 시나리오 제정 연구

A study on establishing the accident scenarios for crashworthiness of rolling stocks

구정서* 조현직*, 권태수**
Koo, Jeong-Seo Cho, Hyun-Jik Kwon, Tae-soo

ABSTRACT

In this study, collision accident scenarios are derived for crashworthy design of rolling stocks because the detailed guidelines to complement domestic safety regulations with respect to collision accidents of rolling stocks are under preparation. Through this study, several collision accident scenarios are broadly investigated for those of advanced countries like USA, UK and EU. Next, the basic engineering considerations which are necessary to derive the collision accident scenarios are reviewed and analysed in some details. Finally, two collision accident scenarios are derived considering the circumstances of domestic railroads.

1. 서론

본 연구에서는 국내 철도차량안전기준에서 요구하는 열차 충돌안전도와 관련하여 시행 세칙에 고시할 사고 시나리오를 제안하였다. 국내 충돌사고통계를 분석하고 국내외의 열차 사고시나리오를 조사하여 충돌 사고 시나리오 제정에 필요한 공학적 고려 요소를 도출하고 비교 분석하였다. 이러한 분석 결과를 토대로 국내 현실에 적합한 표준 충돌사고 시나리오를 도출하고 선진국 등 해외 충돌사고 시나리오 [1-3]과 비교하여 타당성을 분석하였다.

먼저 국내에서 발생한 충돌사고에 대하여 사고통계를 분석하여 충돌 속도, 충돌사고 유형(장애물 충돌, 열차 대 열차 충돌 등), 주요 사고원인, 충돌 대상물체, 충돌 사고의 피해저감 방안 등을 분석하고 충돌이 원인이 된 탈선사고 통계도 분석하였다. 이와 아울러 선진국의 충돌사고 시나리오를 조사하고 충돌사고 시나리오 제정에 적용된 역학적 원리[4-9]를 분석하였다. 또 유럽과 미국의 충돌안전도 관련 규정[4-6]과 표준사고시나리오를 분석하여 제정될 국내 충돌사고 시나리오가 국제적인 표준 안전도 규정[6,7,10]에 부응할 수 있는 방안을 강구하였다.

2. 국내의 열차 충돌사고 분석

1999년부터 2003년까지 철도청(현 한국철도공사)의 사고장애월보에 나타난 열차 충돌 사고를 조사하여 탑승자 사상이 발생한 열차 대 열차 충돌사고와 열차 대 장애물 충돌사고를 대상으로 충돌시 열차 속도, 충돌사고 원인, 충돌 대상물체, 사고피해 저감 방안 등을 분석하였다. 본 사고통계 분석에서 얻어진 결과가 제정 중인 국내 충돌사고 시나리오에 잘 반영될 수 있도록 하였다.

* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원
E-mail : koojs@snut.ac.kr
TEL:(02)970-6878, FAX:(02)948-1651
** 정회원, 한국철도기술연구원

2.1 열차 충돌속도 분석

그림 1은 사고통계 조사 기간동안 발생한 열차 대 열차 충돌사고의 충돌 속도와 사상자를 나타낸 것이다. 이 그림에서 조사된 열차 대 열차 충돌사고의 평균충돌속도는 상대속도 기준으로 51kph 이고 최고 충돌속도는 65kph 이었다.

그리고 그림 2는 열차 대 장애물 충돌사고에 대하여 속도별 사고발생빈도를 나타낸 것이다. 분석된 열차 대 장애물 충돌사고의 평균충돌속도는 45.47 kph 이었다. 열차 대 장애물 충돌의 경우 충돌속도가 높아지면 사고 빈도가 급격히 감소하는 경향을 보이는데, 100kph 이하의 장애물 충돌 사고가 전체의 95.6%이고 110kph 의 경우는 98%에 달한다.

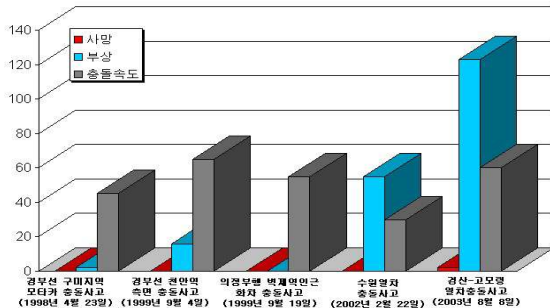


그림 1. 열차 대 열차 충돌사고 통계

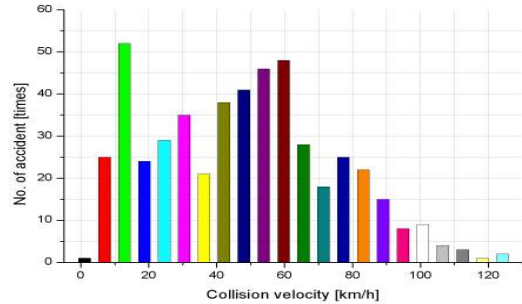


그림 2. 열차 대 장애물 충돌사고 통계

2.2 충돌사고의 유형별 빈도 분석

사고분석 기간동안 열차에 충돌이나 충격이 발생한 사고(총 309건)를 대상으로 건널목 사고, 선로장애 사고, 열차 대 열차 사고, 유리창충격 사고 등으로 분류하여 유형별 발생빈도를 분석하면 그림 3과 같다. 건널목 사고(51%)와 선로장애물(28%) 충돌이 대부분이나 대형 사고의 위험이 극히 높은 열차 대 열차충돌(15%)도 상당히 높은 수준이었다.

2.3 충돌 대상 물체별 빈도 분석

그림 4는 사고분석 기간동안 열차에 충돌이나 충격이 발생한 사고(총 309건)를 대상으로 피충돌 물체별 빈도를 분석한 것이다. 충돌사고의 대부분은 열차 탑승자 피해가 경미한 승용차(56%)와의 충돌이었지만, 열차 탑승자에게도 매우 위험한 열차, 트럭, 작업차량, 차막이와 충돌이 전체의 47% 수준으로 상당히 높은 수준이었다.

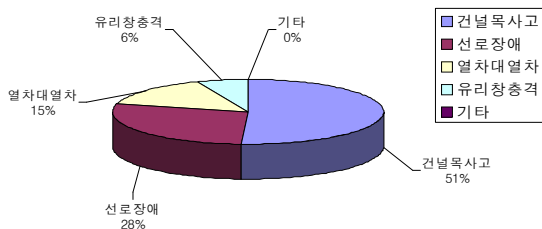


그림 3. 충돌사고의 유형별 빈도

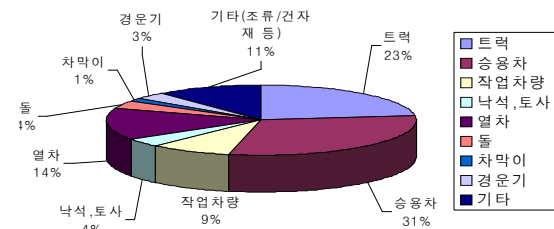


그림 4. 충돌사고의 대상물체별 빈도

2.4 충돌사고 원인별 빈도 분석

그림 5는 사고분석 기간동안 발생한 충돌 사고(총 309건)를 대상으로 사고 원인을 분석한 것이다. 주요 원인으로서는 법규위반(50%), 운전자 부주의(13%), 작업자 부주의(11%), 공중 부주의(9%) 등 인적요인이 91%로 대부분이며, 나머지는 기후 및 외부환경(9%)이었다. 그런데 신호제어나 차량이 원인(제동 불량 등)인 경우는 발견되지 않았다.

2.5 충돌이 원인인 탈선사고 빈도 분석

그림 6은 충돌이 원인이 된 탈선사고 빈도를 파악하기 위하여, 사고분석 기간동안 발생한 탈선 사고(총 178건)를 대상으로 사고 원인을 분석한 것이다. 탈선사고 빈도는 분기기 장애(44%), 선로 장애물 충돌(17%), 선로결함(13%), 곡선부 고속주행(11%), 열차간 충돌(8%) 등의 순이었다. 여기서 충돌이 원인인 탈선사고는 선로 장애물 충돌과 열차 충돌을 합쳐서 25%로 높은 수준이며, 곡선부 고속 주행시 탈선(11%)은 2005년 일본 효고현 탈선사고와 같이 반드시 차량간 또는 외부 물체와 충돌사고를 수반할 수 있다.

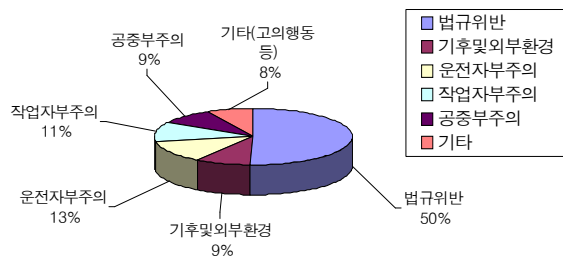


그림 5. 충돌사고의 원인별 빈도

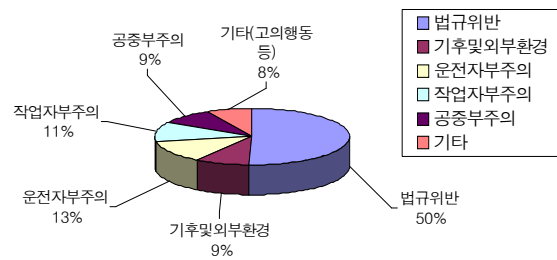


그림 6. 탈선사고의 원인별 빈도

2.6 충돌 사고시 피해저감 방안 분석

앞에서 충돌사고의 유형과 원인을 분석한 결과, 충돌사고방지(active safety)를 위하여 인적요인, 건널목, 선로환경 개선이 중요하였다. 이와 아울러 충돌사고 발생시 승객보호(passive safety)를 위하여 충돌 사고 유형을 피해저감 대책별로 분류할 필요가 있었다. 그림 7은 사고분석 기간동안 발생한 충돌 사고(총 309건)에 대하여 피해 대책별로 사고유형으로 분류한 것이다.

분석 결과, 경충돌 (에너지 흡수식 연결기), 선로장애물 (완충형 배장기), 측면 충돌 및 중충돌 (타고오름 방지장치, 충돌안전설계, 안전의자), 유리창충격 (방탄유리), 기타 선반위 물체추락(선반구조개량) 등 다각적인 개선이 필요하였다.

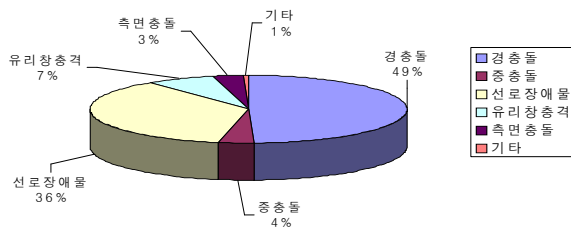


그림 7. 충돌사고의 피해저감을 위한 대책별 빈도

3. 충돌사고 시나리오의 충돌속도 도출 원리

충돌사고 시나리오에 사용되는 충돌 속도는 그림 8에 도식한 원리로 도출할 수 있다. 즉 운전자가 전방에 충돌 상황을 인지하고 급제동을 취급하는 경우를 가정하면, 공주시간과 제동효율을 고려하여 최종적으로 장애물과 충돌하는 속도를 계산할 수 있다. 이를 위하여 먼저 선로의 선형과 주변 환경 등을 고려하여 가시거리 (dV)를 추정한다. 초기속도(Vm)로 주행하는 열차에서 장애물을 인지하여 급제동을 취급하는 동안 공주하는 거리(dC)와 그 후 제동시스템이 작동하여 제동이 부과되는 동안 공주하는 거리(dF)를 가시거리(dV)에서 뺀 후 잔여거리(dV-dC-dF)에 대하여 제동 감속 효과를 고려하면 충돌속도(V collision)가 계산된다.

공주거리 (dC+dF)를 계산하기 위하여 총 공주시간을 산정하여야 한다. 우선 위험에 대한 운전자 반응시간이 0.38~0.5초 정도 필요하고, 또 제동변을 제동위치로 옮기더라도 압력공기 유동과 기초 제동장치 유간 때문에 즉시 100%의 제동효과가 발휘되는 것이 아니므로 제동이 완전히 작용하기까지는 어느 정도

의 시간이 필요하게 된다. 이 공주시간은 운전자, 열차 차종 및 편성, 제동방식 등에 따라서 상당히 큰 차이가 발생하는데, 대개 비상제동시 여객열차는 2-4초, 화물열차는 3-9초, 전동열차의 경우 1.5초 정도이다.

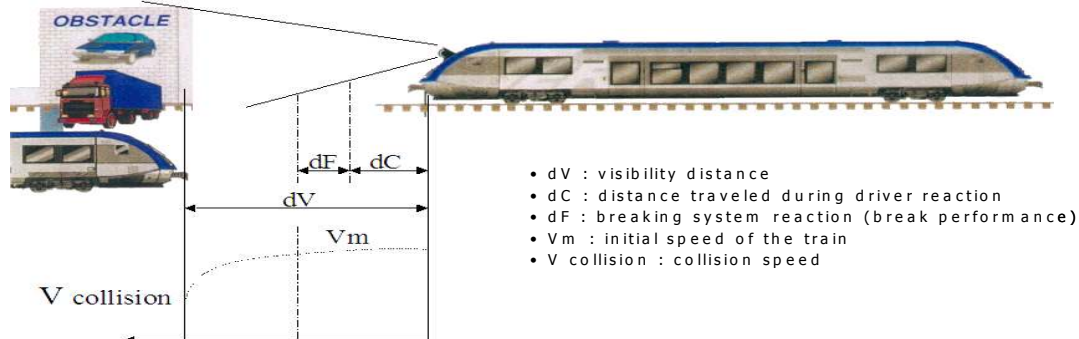


그림 8. 충돌속도 추정 원리

그러나 이러한 이론적인 계산방법으로 충돌속도를 산정하는 방법은 원리는 그럴듯하지만 현실적으로 사고 시나리오에 사용할 충돌속도를 산정하는데 어려운 점이 많다. 왜냐하면 운행조건, 차종 및 편성, 선로 상태, 날씨나 기후 등 환경요인이나 운전자의 개인차 등에 따라서 매우 상이한 충돌속도가 도출될 수 있기 때문이다. 따라서 충돌사고 시나리오가 잘 정비된 선진국의 경우, 먼저 일정기간 동안 발생한 충돌사고를 대상으로 열차 대 열차충돌, 장애물 충돌, 건널목 충돌 등 충돌사고유형별로 분류하고 각 분류별로 실제 충돌속도를 분석하여 통계자료를 만들어서 각 분류별 사고의 70~80% 가 포함되도록 충돌사고 속도를 도출하고 있다. 이와 더불어 대표 사고와 대표 차종 및 편성을 선정하여 이를 대상으로 표준화된 가시거리, 공주거리 및 제동거리와 초기 속도를 적용하여 충돌속도를 산출하고 있다.

4. 국내의 충돌 사고 시나리오 분석

4.1 국내 충돌 사고 시나리오

2000년 제정된 도시철도법 하위 차량안전기준 및 2005년 제정된 철도안전법 하위 철도차량안전기준에서는 충돌사고에 대비한 차량설계를 요구하고 있다. 도시철도 차량안전기준에서는 동일 열차와 상대속도 20 kph 로 충돌하는 사고를 시나리오로 규정하고 있지만, 철도안전법 하위 철도차량안전기준에서는 충돌사고 시나리오를 시행세칙에서 규정하도록 되어 있으며, 본 연구에서 그 시행 세칙을 준비중이다. 따라서 본 절에서는 그 동안 G7 고속전철 개발 연구사업과 기존선 고속화 탈팅열차(TTX) 개발 사업에서 적용된 연구 목적의 충돌사고 시나리오를 살펴보고, 앞에서 분석한 국내 충돌사고 통계와 연계하여 분석하고자 한다.

① G7 고속전철의 충돌 사고 시나리오

- 열차 대 열차 중충돌: 동일 열차와 30kph의 충돌속도로 정면충돌(경부고속전철에도 적용)
- 트럭과 건널목에서 중충돌: 110kph의 충돌속도로 정지된 15ton 강제 장애물과 충돌
- 열차 대 열차 경충돌: 8kph의 정면충돌(상대속도 16kph 충추돌)

② 기존선 고속화 탈팅열차의 충돌사고 시나리오

- 열차 대 열차 중충돌: 동일열차와 상대속도 36kph로 충돌
- 트럭과 건널목에서 중충돌: 15ton의 선로 장애물과 75kph로 충돌

③ 도시철도의 차량안전기준 제 22조

- 동일한 전동열차와 상대속도 20kph 로 충돌

앞에서 분석한 철도청 열차충돌사고 통계에서 열차 대 열차 충돌사고의 경우, 사상자 발생한 사고의 평균

충돌속도는 51kph 이고 최고 충돌속도는 65kph 이었다. 한편 열차 대 장애물 충돌사고의 평균충돌속도는 45.47kph 이고, 최고충돌속도는 약 130kph 이었다. 그리고 이 경우, 75kph 이하의 장애물 충돌 사고가 전체의 80%, 100kph 이하가 전체의 95%이고 110kph 이하 경우는 98% 이었다. 이러한 결과와 위의 ①, ② 사고 시나리오를 비교해 볼 때 G7 고속전철의 충돌 사고 시나리오는 사고 통계상 충돌 속도를 대부분 만족시키지만, 기존선 고속화 틸팅열차의 충돌사고 시나리오는 약간 미흡한 수준이라고 할 수 있다. 다만, 위의 통계치가 최근 5년간 열차충돌사고에 국한된 것이고, 열차대 열차 사고의 경우 사고 통계건수가 부족한 점이 한계이다. 도시철도의 경우 mechanical fuse 등 에너지흡수부품으로 대응 가능한 수준이다.

4.2 프랑스의 충돌 사고 시나리오

그 동안 프랑스 SNCF에서 사용해왔던 충돌사고 시나리오는 고속전철, 급행열차와 도시형 철도 등 3 종류가 있다[1]. 첫째, 고속전철의 경우에는 그림 9와 같이 도시근교 구간에서 160 kph 속도로 운행하던 중 500m(선로의 운전자 가시거리) 전방의 장애물을 발견하고 급제동한 상태로 충돌하는 사고시나리오를 사용한다. 본 시나리오의 표준사고모형(reference accident)은 1988년 Voiron 지역에서 발생한 TGV 충돌사고인데, 충돌속도는 110kph이며, 장애물중량은 80ton이었다. 본 사고시나리오는 TGV-Duplex 개발에 적용된 것으로 전두부 충격 에너지 흡수량이 높은 가혹한 충돌조건이다.

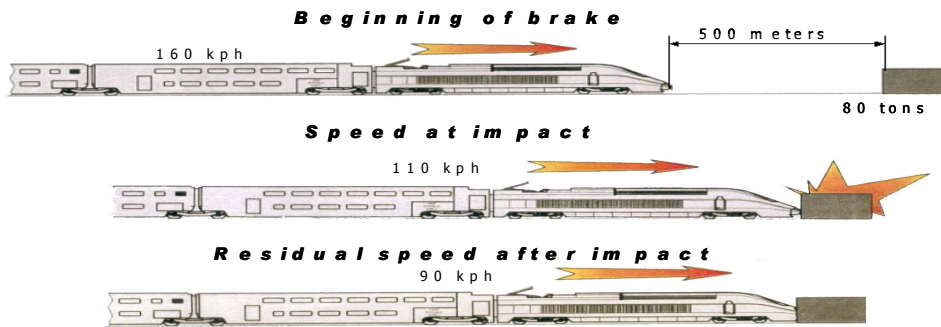


그림 9. TGV-Duplex의 충돌 시나리오

둘째로 도시간 급행열차(intercity express train)뿐만 아니라 일반고속전철에도 적용되는 사고 시나리오인데, 그림 10과 같이 도시근교 구간에서 160kph 이하의 속도로 운행하던 중 500m 전방에 15ton 장애물을 발견하고 급제동한 상태로 110kph 속도로 충돌하는 사고 시나리오이다. 이 사고 시나리오는 도시간 급행열차 XTER71500 DMU와 고속전철인 TGV-NT 개발에도 적용되었다.

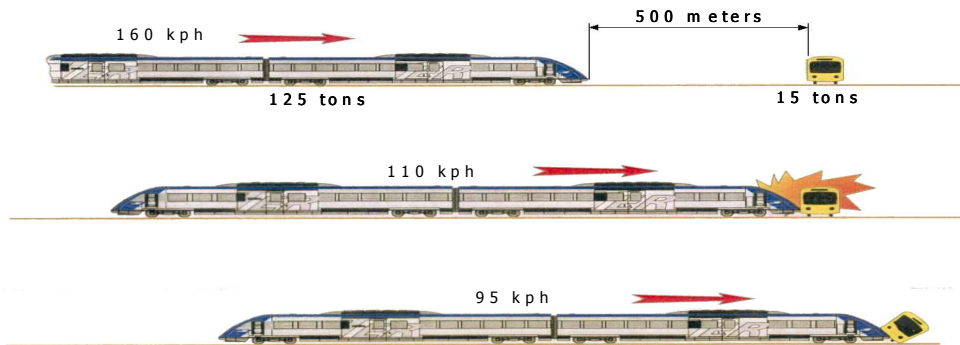


그림 10. 도시간 급행열차인 XTER DMU의 충돌 시나리오

셋째, 도시형 철도 차량의 경우에는 그림 11과 같이 도시지역(광역도시철도 포함)에서 최고 120kph 이하의 속도로 운행하던 중 300m(선로의 운전자 가시거리) 전방의 장애물을 발견하여 급제동한 상태로 충돌하는 시나리오를 사용한다. 이때 충돌 속도는 65kph이며, 장애물은 15ton의 강체로 정의된다.

본 충돌시나리오는 도시철도차량인 ATER X73500 EMU 의 개발에 적용된 것이다.

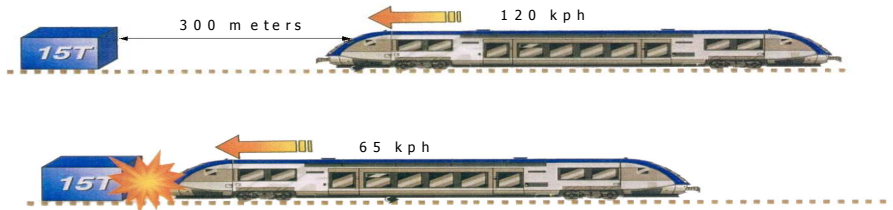


그림 11. 도시철도차량인 ATER EMU의 충돌시나리오

4.3 영국의 충돌 사고 시나리오

1990년대 초반부터 영국 BRR 연구소에서는 열차의 충돌안전도 기술개발 연구를 시작하였는데, 우선 사고통계분석을 통하여 충돌사고 유형, 속도, 피해수준 등을 정밀하게 분석한 결과 다음과 같은 3가지 종류의 충돌 시나리오와 설계개념을 정립하였다[2,3].

- 심한조차 충돌(Heavy shunt): 상대속도 15kph의 열차 대 열차 충돌 사고로 완충장치에서 충격을 흡수하는 것이 목표
- 경충돌(Light collision): 상대속도 30kph의 열차 대 열차 충돌 사고로 쉽게 수리할 수 있는 에너지 흡수부품(mechanical fuse 등)에서 충격에너지를 흡수
- 중충돌(Heavy collision): 상대속도 60kph의 열차 대 열차 충돌 사고로 차량의 비탑승자 영역에서 1m 이내의 압괴가 발생하여 1MJ 정도의 충격에너지를 흡수

BRR의 연구에서 정립된 충돌에너지 흡수 설계 개념은 현재에도 가장 보편적으로 인용되는 설계 방법론이다. 그러나 심한조차 충돌이나 경충돌은 운영자가 유지보수 관점에서 경제성을 고려하여 결정할 사안이므로 RSPG나 GMRT와 같이 충돌안전설계를 의무화한 기준에는 포함되지 않고 있다. 현재 영국에서 적용되는 충돌사고 시나리오는 GMRT 2100에 규정되어 있는데 다음과 같다.

- 열차 대 열차 충돌: 동일한 열차 사이에 상대속도 60kph 로 충돌
- 장애물 충돌: 선로장애물과 160kph로 충돌하는 것을 가정한 배장기 정적 강도조건 375kN을 적용
- 지붕 낙석 충돌: 사람이 탑승하는 구역의 모든 지붕은 3.0m 높이에서 100kg의 콘크리트 육방체를 떨어뜨릴 때 관통되지 않을 강도조건

4.4 독일의 충돌 사고 시나리오

영국, 프랑스와 달리 독일의 경우 1990년대 초중반에는 열차의 충돌안전도 설계에 대하여 소극적인 입장을 견지하고 있었다. 체계적인 연구 개발은 물론이고 최소한의 충돌안전도 설계기준도 마련하지 않았다. 단지 고속전철인 ICE 전두부에 알루미늄 honeycomb을 장착하는 형식적인 수준의 대응만 하고 있었다. 그러나 1998년 에세테에서 발생한 ICE 열차의 탈선사고로 객차들이 상호 충돌하거나 교각과 충돌하면서 100명 이상이 사망하는 대형사고가 발생하여 충돌안전도 설계에 대한 비판과 자성이 있었다. 2005년이후 prEN15227 충돌안전도 규격을 DIN규격에 편입하여 사용하고 있다.

다음은 prEN15227을 도입하기 이전에 사용하던 충돌사고 시나리오이다.

- 열차 대 열차 충돌: 36 kph 의 상대속도로 동일한 열차 사이의 충돌
- 건설목 충돌: 10~20 ton인 탱크형 트럭과의 충돌
- 배장기 충돌: 자동차, 말, 황소 등과의 충돌

4.5 미국의 충돌 사고 시나리오

미국에서는 1990년대 FRA 주도로 열차승객을 보호하기 위하여 체계적인 연구를 수행하였다. 2000년대 들어서 그 연구 성과를 반영하여 열차 등급별 안전도 규정을 제정하고 있다. 물론, 최근의 새로운 규정이 제정되기 이전에도 경전철이나 일반 열차에 대하여 기본적인 충돌안전성을 확보하기 위하여 차체 구조와 충돌기둥 강도에 대한 설계표준(design standard)을 적용해 왔다[4-6]. 그러나 최근 AMTRAK의 ACELA 와 같이 200kph 급의 고속철도가 도입되면서 기존 구조강도 개념의 설계표준으로는 미흡하다는 인식하에 새로운 충돌안전도 성능규정(performance standard)을 제정 적용하고 있다. 1999년에 제정된 49CFR 238.403(CEM)에 규정된 표준 충돌사고 시나리오는 30mile/h (48kph)로 동일한 열차와 정면충돌하는 사고를 대상으로 한다. 충격가속도가 50Hz로 필터링하여 8g 이하일 것과, 그림 12와 같이 차체 각 영역에서 규정된 충격 에너지 흡수를 요구하고 있다. 또한 최종 충돌안전도 평가에서는 15, 30, 60, 100mph 등 다양한 속도에서 충돌 해석을 수행하여 충격 가속도의 객실의 침투(seat loss) 정도를 첨부하도록 하고 있다.

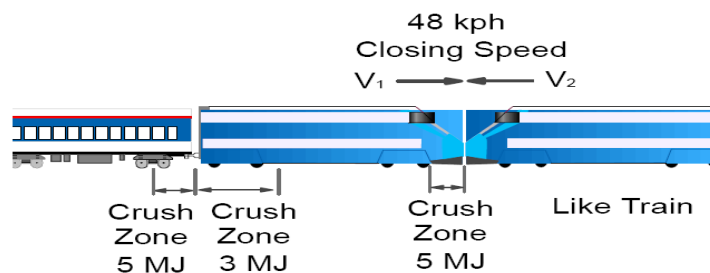


그림 12. 미국 FRA의 충돌사고 시나리오

4.6 EU의 TSI 충돌사고 시나리오

EU에서는 제도와 표준이 다른 국가들을 통과하는 국제철도의 상호 운전성과 안전성을 향상시키기 위하여 2002년 5월 TSI (Technical Specification for Interoperability)를 제정하였다[7]. 충돌안전도 관련 규정은 TSI 4.1.7의 passive safety항에 있으며 사고 시나리오는 부록 A에 규정되어 있다. 그림 13은 200kph 이상의 고속철도차량에 적용되는 TSI 충돌사고시나리오 개념이다.

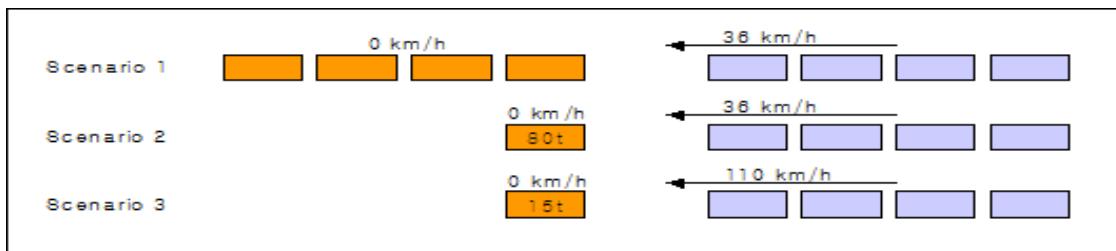


그림 13. 유럽 TSI의 충돌사고 시나리오

- 시나리오 1: 서로 동일한 고속열차가 36kph 속도로 충돌
- 시나리오 2: 고속열차가 측면 완충기를 가진 화차 (80ton 인 UIC 571-2의 4축 화물차)와 36kph로 충돌
- 시나리오 3: 110kph 속도로 15ton 수직강체로 가정된 화물자동차와 건널목에서 충돌

4.7 EU SAFETRAN 연구의 충돌사고 시나리오

SAFETRAN 연구는 유럽에서 열차의 충돌안전도를 획기적으로 높이기 위하여 1997년부터 4년간 철도운 영기관(DB, SNCF), 차량제작사(Bombardier, Alstom, Siemens), 대학(Dresden TUD, Lisbon IST, Lisbon FMH, Valenciennes UVHC), 연구소(AEA, Cranfield Impact Center, Poland CNTK, ERRI, DWA) 등이 참여한 대형 국제공동연구이다[8]. 본 연구의 주 대상 열차는 국제간 급행 이상의 철도차량이며, 충돌사고 시나리오는 그림 14와 같다.

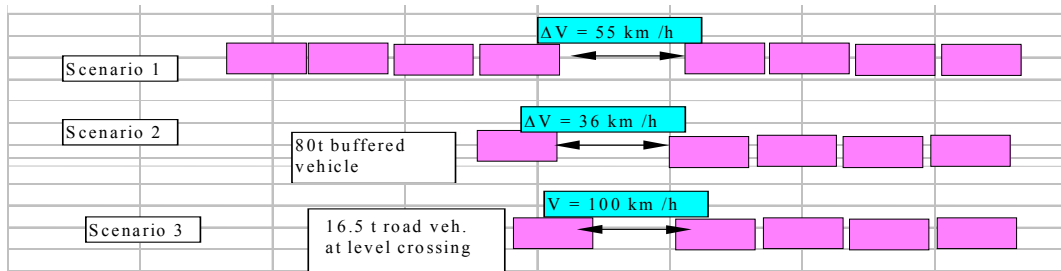


그림 14. 유럽 SAFETRAN 연구의 충돌사고 시나리오

- 시나리오 1: 서로 동일한 열차가 55kph 속도로 충돌
- 시나리오 2: 측면 완충기를 가진 80t 화차와 36kph 속도로 충돌
- 시나리오 3: 100kph 속도로 15ton 수직강체로 가정된 16.5ton 화물 자동차와 건널목에서 충돌

이 충돌시나리오와 TSI 충돌시나리오를 비교하면, 시나리오 2의 경우 완전히 일치하고, 시나리오 1의 경우 충돌속도가 19kph 높으며, 시나리오 3은 충돌속도는 10kph 낮은 대신 장애물의 중량은 1.5 ton 무겁다. 본 연구 성과로 위의 사고시나리오를 만족시키는 전두부 모듈, 운전실 및 데스크 모듈, 객차 끝단 구조 모듈 등이 개발되었으나 TSI가 강제규정이므로 사고시나리오를 대폭 완화하여 시행하고 있다.

4.8 EU SAFETRAM 연구의 충돌사고 시나리오

SAFETRAM 연구는 경전철의 충돌안전도를 획기적으로 높이기 위하여 2001년부터 3년간 유럽의 철도운영기관, 경전철 운영사, 차량사, 대학, 연구소 등이 컨소시엄을 구성하여 진행한 대형 국제공동연구이다[9]. 주요 연구대상은 city tram과 periurban tram 이다. City tram은 시내에서 주행하는 저상 관절형 차량으로 자동차와의 충돌이 고려된 EU의 사고통계 분석결과를 반영하여 사고 시나리오를 도출하였으며, periurban tram은 도시외곽 노선에서는 기존 열차와 혼합 운행되어 발생하는 충돌 사고를 고려하였다.

City tram의 충돌사고 시나리오는 다음 C1~C4 등 4가지를 적용하였는데, 표준차량편성은 20ton-35ton-45ton 으로 정하였다.

- C1 시나리오: 비상제동에 의한 평균 감속도가 2.73 m/s^2 수준 일 것
- C2 시나리오: 동일 city tram과 20 kph 속도로 충돌
- C3 시나리오: 3ton 중량의 경트럭과 25 kph 속도로 충돌
- C4 시나리오: 55ton 중량의 차량으로 편성된 periurban tram과 10 kph 속도로 충돌

Periurban tram의 충돌사고 시나리오는 다음 P1~P4 등 4가지를 적용하였으며, 표준차량편성은 55ton 차량들로 편성하였다.

- P1 시나리오: 80ton 인 UIC 526-1 완충기를 가진 화차와 25kph 속도로 충돌
- P2 시나리오: 129ton 인 철도차량 (SAFETRAN 연구의 C type)과 25kph 속도로 충돌
- P3 시나리오: 동일한 periurban tram과 3 kph 속도로 충돌
- P4 시나리오: 40kph 속도로 16.5ton 화물 자동차와 충돌

그림 15는 P1~P4 시나리오의 개념을 도식적으로 나타낸 것이다.

- Scenario P1: Collision against a rail vehicle (80 ton freight wagon).



- Scenario P2: Collision against a train (129 ton Train Type C – SAFETRAIN).



- Scenario P3: Collision against an identical periurban tram.



- Scenario P4: Collision against a truck (16.5 ton rigid truck).



그림 15. 유럽 SAFETRAM 연구의 periurban tram 충돌사고 시나리오

4.9 prEN15227의 충돌사고 시나리오

앞에서 분석한 바와 같이 1990년대에는 프랑스, 독일, 영국 등 유럽 철도선진국들이 각자 고유한 충돌안전도 기준을 적용하였는데, 철도운행의 통합성 측면에서 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 우선 국제열차를 대상으로 유럽표준 TSI 규정을 제정하여 실시하였고, 이어서 유럽표준 충돌안전규정인 prEN15227을 제정 고시하였다[10]. PrEN15227은 앞에서 살펴본 바와 같이 SAFETRAIN 및 SAFETRAIN 연구결과를 보수적으로 반영하여 도출된 것으로서 고속철도차량인 경우에는 TSI 규정과 부합한다. 그러나 prEN15227은 2007년부터 정식 발효되며, 고속철도차량뿐만 아니라 모든 범주의 철도차량을 포함하고 있으므로 완결된 충돌안전도 표준규정이라고 할 수 있다. 표 1은 prEN15227에서 정의한 차량범주에 대한 분류표로서 차량종류를 P-I에서 P-V까지 5가지로 분류하였다.

표 1. prEN 15227의 차량범주 분류

범 주	완충기/연결기 압축하중	예 시
P-I	2000kN	기관차, 객차
P-II	1500kN	고정편성열차
P-III	800kN	지하철, 중량전철
P-IV	400kN	경량전철, 중량노면전철
P-V	200kN	노면전철

이렇게 분류된 5가지 차량범주에 대하여 다음에 정의된 4가지의 사고시나리오를 규정하였다.

① 충돌 시나리오 1: 동일 편성 열차간의 충돌

-36kph의 상대속도로 동일 편성 열차간의 충돌 (차량범주 P-I ~ P-V)

-단, 자동열차보호시스템이 있고, 동일 철도망에 다른 유형 차량의 운행이 제한되어 있으며, 모든 선로 위의 운행이 한 방향을 향하고 있는 경우, 차량범주 P-III와 P-IV는 표준충돌속도 25kph가 가능

② 충돌 시나리오 2: 측면 완충기를 장착한 철도차량과 충돌

-차량범주 P-I과 P-II의 경우, 완충장치를 장착한 80ton 화차와 36kph로 충돌

-차량범주 P-III와 P-IV의 경우, 해당 노선을 운행하는 화차중 완충장치를 장착한 가장 무거운 화차와 36kph로 충돌

-차량범주 P-IV의 경우, 혼합운행 조건에서 지역노선 철도차량(regional train unit)과 10kph로 충돌

-차량범주 P-V의 경우, 충돌면이 수직인 55ton의 강체와 10kph로 충돌

③ 충돌 시나리오 3: 거대 장애물과 충돌

-차량범주 P-I ~ P-III의 경우, 15ton 장애물 (prEN15227의 부록C에 정의된 변형 가능한 장애물)과 110kph (건널목에서 운행속도가 160kph인 경우, 만약 철도 건널목에서 차량의 운행속도가 160kph

를 벗어나면, 다음 공식에 상응하는 충돌속도로 조정: $v_c = v_{op} - 50\text{kph}$. v_{op} 는 철도 건널목에서 최고운
행속도. v_c 는 40kph, 혹은 철도 건널목 규정 속도 중 낮은 수치)로 충돌

-차량범주 P-IV의 경우, 15ton 장애물(prEN15227 부록C에 정의된 장애물)과 40 kph 로 충돌

-차량 범주 P-V의 경우, 3ton 강제 장애물과 25 kph 로 충돌

④ 충돌 시나리오 4: 작은 장애물과 편성열차의 충돌(배장기 강도 요구조건)

-차량범주 P-I ~P-IV 공히, 운행속도 (160kph 140kph, 120kph, 80kph 이하)에 따라 prEN15227
의 부록A에 정의된 정적 강도와 에너지 흡수 능력을 가질 것

5. 결 론

본 연구를 통하여 국내 사고통계와 국내의 충돌사고 시나리오를 분석하여 다음 결론을 얻었다.

- ① 국내 사고통계를 분석한 결과, 열차 대 열차사고의 평균상대충돌속도는 51kph, 최고 충돌속도는 65kph 이었다. 또 열차 대 장애물사고의 평균충돌속도는 45.47 kph 이고, 100kph 이하의 장애물 충돌 사고가 전체의 95.6%, 110kph 의 경우는 98%에 달하였다.
- ② 국내의 경우, KTX와 G7 차량이 상대속도 60kph 충추돌과 15ton/110kph 장애물충돌을 고려하였고, TTX는 상대속도 36kph 충추돌과 15ton/75kph 장애물 충돌을 적용하였다.
- ② 미국의 경우, 48kph 열차 대 열차 충돌을 적용하는데, 차체강도조건이나 운행조건이 국내와 크게 다르다.
- ③ 유럽의 경우, 초기에는 각국이 고유한 사고시나리오를 사용하였으나, 국제철도를 위한 TSI를 거쳐서 최근에는 prEN15227로 통합되는 추세이다. prEN15227은 2007년 정식 발효된다.
- ④ 본 연구에서는 국내철도 여건과 국제적 추세를 고려하여 UIC에서 고시한 prEN15227의 충돌시나리 오 1, 3을 원용하여 제안하였다. PrEN15227 충돌시나리오 2는 측면완충기 부착 화차와의 충돌로 국내와 여건이 달라서 배제했고, 충돌시나리오 4는 배장기 사양에서 별도로 다룰 것이다.

References

1. L-M. Cleon, J. Legait, D. Leveque(1997), "Passive safety concepts applied to TER X7250 Diesel railcar," WCCR, Vol. D, pp. 861-867
2. A. Scholes and J-H. Lewis(1993), "Development of crashworthiness for railway vehicle structures," IMechE, Proc Instn Mech Engrs, Vol.207, pp.1-16
3. A. Scholes(1996), "Developing crashworthiness technology in Europe," WCCR '96.
4. D-C. Tyrell(2001), "U.S. Rail Equipment Crashworthiness Standards," Presented at Institute of Mechanical Engineers Headquarters, London, England.
5. American Public Transportation Association, Member Services Department(2000), "APTA SS-C&S-034-99 Standard for the Design and Construction of Passenger Railroad Rolling Stock."
6. U. S. DOT, FRA(1997), "Passenger Equipment Safety Standards; Proposed Rule," Federal Register, 49 CFR Part 216 et al.
7. AEIF(2002), "The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system," TSI.
8. ADT/SOR(2001), "Train Crashworthiness for Europe," SAFETRAIN/final report.
9. BT/P(2002), "Passive Safety of Tramways for Europe," SAFETRAM/Management report.
10. FCD(2005), "Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies," prEN15227.