

철도 안전성 평가를 위한 시험설비 구축 방안

A Scheme of Facility Construction for Evaluation of Safety on the Railway

최경진* 김상암** 조연옥** 김윤미**
Choi, Kyung-Jin Kim, Sang-ahm Cho, Youn-ok Kim, yun-mi

ABSTRACT

Railway systems are one of the best mass transit systems and many people have prevented incidents/accidents and reduced fatalities remarkably. Especially we have tried analyzing and finding the measures to prevent catastrophic accidents like train collision, derailment and fire because of their severities. It is important to assess the safety performances of railway systems like crash-worthiness analysis, body, derailment affecting factor analysis and so on for reducing and finding out the reasonable causes of disastrous accidents.

In this paper the refined top-level system requirements to build-up national infra for assessing railway safety performance and the procedures and methodology for reviewing, verifying and validating infra requirements are explained. Basically the authors have used system engineering processes to analyze and verify the requirements and installation procedures and have tried maximizing the practicality of the various safety assessment systems.

1. 서론

철도는 종합시스템에 속하며 안전사고를 예방하고 피해를 감소하기 위하여 많은 노력을 기울여야 한다. 특히, 충돌, 탈선, 화재의 경우는 대형 사고를 유발하며, 인명과 재산피해가 크므로 철도의 중대사고로서 안전의 핵심기술로 가장 우선적으로 문제를 해결하고 안전성을 평가할 수 있어야 한다. 철도는 최대의 장점으로 정시성과 편리성을 가지면서 안전성이 높다는 것이다. 그러나, 철도의 안전성은 궤도 열차의 특성이 지상에 설치한 궤도를 동일 궤적으로 차량이 주행할 수 있는 교통시스템으로서 상대적으로 자동차나, 비행기보다 안전한 구조와 형상의 운동을 하고 있기 때문이다. 그러한, 철도의 안전성은 매우 우수하지만 대량의 수송수단이므로 인적오류나 기술적인 불안전성과 결합요인의 잠복성에 대하여는 실시간으로 평가하고 예방할 수 있어야 한다. 특히, 대형화재의 발생에 대비한 각종 안전성능 평가, 충돌 시 충격 피해와 차체 압괴에 의한 인명 피해를 줄이기 위한 안전성능 평가, 운행 중에 발생할 수 있는 열차의 탈선에 대한 안전성능을 평가하는 시험설비는 매우 중요한 역할을 수행하기 위한 시설에 속한다.

본 연구는 국가의 철도에 대한 안전성을 평가할 수 있는 시험설비 구축 방안으로 요구사항을 다양하게 검토하고, 검증하여 우선 구축 시험설비에 대하여 기본사양과 구축절차를 SE체계로 분석하였으며, 시험설비의 구축 이후에 활용성을 극대화하기 위하여 기본사양 및 설계, 제작 및 품질 평가, 안전성 검증, 유지보수 등 전주기 공정을 시스템적으로 접근하고자 하였다.

* 한국철도기술연구원, 철도종합안전기술개발사업단, 정회원

E-mail : kjchoi@krri.re.kr

TEL : (031)460-5242 FAX : (031)460-5509

** 한국철도기술연구원, 철도종합안전기술개발사업단, 정회원

2. 대형 철도사고의 안전성 분석

2.1 철도 시스템의 안전성

철도시스템은 궤도와 차량 및 신호시스템이 각자의 기술적인 안전성을 가지고 있어야 한다. 이를 운전으로 대응하는 시스템과 관제시스템이 통제와 유기적인 흐름의 역할에서 실시간으로 열차와 궤도, 신호 시스템 사이에 운행 중에 안전한 활동을 해야 한다. 이를 정리하면 그림 1과 같다.

표 1 철도 시스템과 안전성 평가 프로그램

철도 시스템 구성	운전, 차량, 궤도, 신호	시스템 공학 기술 수준
운영 및 수송체계	운전, 관제, 교육, 훈련, 비상대응	인적 수준 및 오류 예방
안전성 평가 및 검증	인증 및 위험도 평가/안전성 시험설비	중대사고 및 고장의 예방 /피해저감

철도 시스템의 안전성은 복합적 철도시스템(운전, 차량, 궤도, 신호)의 기술수준, 운영 및 수송체계(운전, 관제, 교육훈련, 비상대응)의 인간공학적 수준 및 불완전 오류의 예방, 안전성 평가 및 검증(인증 및 안전 시험설비)에 의한 중대사고 및 고장의 예방/피해저감에 의해 상호 유기적인 시스템으로 보완되고 있으며, 각자의 고유영역에서 안전 활동을 하고 있다. 대부분 고유 영역의 안전 활동이 상대 영역에 미치는 나쁜 영향에 대하여 실증적 연구 활동에 많은 제약이 있는 것이 현실이다.

정보통신의 발전으로 상호 운용할 수 있는 제안된 정보기술(IT) & 신호 시스템은 서로 연결시킬 수 있는 데이터베이스가 만들어져 유용성이 증대하면서 안전기술 도입에 관련된 입증의 필요하게 된다. 다른 운송수단과 연계되어 여객과 화물 고객의 접근이 가능한 상호 연결 정보, 제어 시스템, 전 차량의 최적화된 유지보수와 연계된, 페일-세이프(fail-safe)한 열차의 배치와 운송 관리, 제동 제어와 운송 성능의 네트워크로 상호 운용성의 측면을 포함하여 열차, 화차, 장비 그리고 화물의 안전한 정지거리 점검, 표준화되고 이해하기 쉬운 형식으로 단말기에 표시된 안전한 운송데이터가 실시간으로 전달이 가능한 것이 요건으로 발전하고 있다.

안전에 대한 전반적인 접근에서 새로운 제품의 평가와 승인에는 점점 더 많은 비용과 시간이 소요된다. 상호 부합성에 대한 내용을 가속화시킴으로써 실제적이고 경제적이 이익을 만들어내는 상호 운용을 위해서, 새로운 승인 기법과 철도시설이 높은 수준의 안전성으로 평가되는 시스템 도입이 필요하다.

안전성 평가를 위한 확인/논증 시스템의 조화, 철도 시스템 분석이 기계적이고 운용 측면의 정확한 정의, 전문가의 선택을 논증하기 위한 정보화 DB를 구축하여 서비스에 대한 반응과 비교, 과도한 세부적인 기준으로부터 철도 산업을 보호하는 반면, 철저한 위험성 분석으로 안전성을 보증해야 한다.

시스템의 위험성을 평가하려면, 철도사고 재해가 갖는 양면성인 피해도와 심각도를 종합적으로 고려하여, 일반적으로는 피해규모의 기대 값, 다시 말해 사고 빈도와 사고 강도를 곱한 피해액을 리스크의 지표로 이용한다. 시스템 안전의 과제는 바로 이러한 유형의 사고피해를 구별해서 사고 예방노력을 집중시켜 그 효과를 극대화하기 위한 것이다.

철도 시스템의 철도차량 및 기반시설을 갖춘 최고의 물류수송의 목표는 더 많은 적재량과 빠른 차량을 사용하여 어느 정도 달성될 수 있다. 하지만, 이 전략이 성공하기 위해서는 제동 및 현가장치 시스템에 대한 차축 하중의 증가가 미치는 영향에 대하여 협동 연구가 필수적이다. 이것은 구체적으로 상호 운용을 위한 요구사항을 만족시키기 위해 차륜과 대차(bogie) 기술 향상에 대한 연구가 뒤따를 것이다. 이때 상호간에 안전성을 해치는 결과에 대하여 충분한 시스템적 접근이 요구된다. 전통적인 상호 운용성 지침의 실행은 차량과 기반시설의 개선과 유지보수 기준의 안전성 보장이 있어야 한다. 철도시스템에서의 기반시설과 차량 규격의 최적화에 대하여 기술적이고 경제적인 연구에 의해 보완되어야 하는 데, 일부의 기술적인 안전성은 다음 사항을 포함하여 총괄적인 시스템 공학 체계로 검토되어야 한다.

- 모델링과 다른 기법을 통해 차량과 기반시설 요소에 대한 이해의 개선
- 열차운용과 기반시설 구성요소와 유지보수의 최적화 설계

- 열차의 운전 조건과 기반 시설의 상태점검에 필요한 이상 진단 시스템의 개발
- 열차속도 및 고 하중(차축하중, 전차선 용량 증가 등)과 시설 적재 하중의 증가
- 열차 운행 주기의 증가에 의한 위험성 증가 및 노선 용량 관리

핵심요소 시스템과 총괄 시스템인 운송 수단과 연계 및 전달에 있어 상호 안전한 운용을 위한 노력이 전반적으로 필요하다. 대량의 인적 물적인 이동이 고속철도로 수송하게 되면 불안정한 위험은 매우 증가하게 된다. 실제 사고사례와 이론적 지식의 교환에 의해 추진하는 안전성의 평가와 관리는 국가적 규정에만 의존하는 것보다 현실적으로 바람직한 안전성 확보와 발전을 가져올 수 있을 것이다.

2.2 안전에 대한 총괄적인 접근1)

철도는 본래 여객과 화물에 안전한 운송수단이고 상업적인 경쟁력의 손실 없이 그 위치를 유지할 필요가 있다. 철도 산업은 대단위 운송의 성장, 네트워크상의 수용 능력, 더욱 빠른 열차의 속도, 운송 제어와 신호의 통합과 같은 주요 사항을 통합시키는 것을 제안할 필요가 있다.

차량 규격, 제작과 원료의 변화는 차량 설계, 점유자 혹은 내용물 그리고 화재에 대한 보호 수준 그리고 내(耐)충돌성에 영향을 미친다. 이 부문에서의 연구 및 기술 개발을 지원하기 위한 운용의 안전성, 설계 인증, 시험, 수용과 유지보수를 관할하는 국가 규범의 조정은 더 나은 상호 운용으로 나아가는 것을 지원하기 위해 필요할 것이다. 안전연구는 지속적으로 재래식 철도(Conventional Train)와 고속철도(High Speed Train), 대중교통(Mass Transit)에도 동일하게 적용될 것이고 국가철도 안전체계를 정의하는데 큰 기여를 할 것이다.

기반시설에서 더욱 증가된 속도의 열차를 운행하기 위한 필요성은 새로운 운용 방법을 요구할 것이다. 철도 시스템 관리는 이미 높은 안전성을 필요로 하기 때문에 국내 철도시스템은 두 가지의 주요한 변화를 겪고 있다. 새로운 고속열차 운용 활동과 기반시설과 열차운용 관리 활동의 분리에 대한 새로운 안전성의 경험이 진행되고 있다. 이것은 사람과 시스템의 결합까지도 철도 시스템의 안전 관계자가 변화에 앞서 안전 목표 달성에 필요한 고도의 안전성을 유지할 수 있는 보장을 위해 전체 철도 시스템의 안전성에 대한 새로운 국가 체계 및 전반적인 시스템 체계 구축의 접근법을 필요로 한다.

지금까지 운송수단과는 다른 기존의 높은 안전성이 달성될 수 있도록 방법을 현대화시키고 그것을 즉각적으로 위험도 평가 방법과 대체하려는 강한 요구가 있다. 제안된 것은 개방적인 접근법과 조화의 목적을 만족시키기 위해 더욱 신중하고 발전하고 있는 두 가지 단계의 접근법에 대한 연구이다.

향후 수년 동안 열차의 제어 및 시스템의 안전성 평가에 대한 현재의 검증 시스템은 유지되고 재래식 철도의 운용성을 높이기 위한 안전 기술규격을 만드는 전문적 연구를 지속하는 동안에 아래의 내용을 포함하는 것이 안전성 확보의 초석이 된다.

- 철도 시스템을 분석할 때, 기계적이고 운용적인 측면을 정의
- 다양하게 응용할 수 있는 적절한 연구 방법의 체계화시키고 분류
- 구체적인 프로젝트 실행에서 얻어진 경험을 기반으로 실행
- 서비스에 반응을 비교해서 전문가들의 선택을 논증할 수 있도록 DB를 구축
- 불필요한 세부규격에서 철도 산업을 보호하며 철저한 평가 수준을 보장하는 지침을 작성
- IT 시스템과 안전에 중요한 시스템에 대한 공통의 수용 절차와 시험 시설의 공유 네트워크
- 높은 수준의 가용성을 유지하기 위해 차량, 신호, 시설 점검과 진단 방법의 개선된 기능
- 우주항공 부문에서 사용되는 고도의 안전한 차량과 기반시설 설계와 유지보수 기법
- 새로운 유지보수 기록 기술 및 점검, 평가 방법과 설계, 개발 프로세스를 제공한 철도 산업 육성
- 고유의 시스템 기술적 고장을 식별하기 위한 방식

3. 요구사항 분석 및 기능 분석/할당

철도 시스템의 대형 사고는 충돌/탈선 및 화재의 분류가 위험요인으로 사고빈도는 높지 않으나 사고 사례의 분석 결과 상당수의 충돌과 탈선 사건의 위험인자가 공유되고 있다는 점은 주목할 만하다. 이러한 대형 사고는 위험발생의 근본적인 원인을 발견하고 제거하기 위한 노력이 매우 중요하며 이를 기초

1) '총괄적 안전'은 철도 안전을 개별적인 요소보다는 '전체적인 안전성'으로 묶는 것을 의미한다.

적으로 접근하여 메카니즘을 분석하고 이를 평가하기 위한 기술적 규명은 이론적인 역학해석이나 실제 열차에서 실험적으로 재현하는 것이다. 이때 두가지 방법에서 모두 많은 노력과 검증의 어려움 현실적인 실차실험의 막대한 비용이 요구된다. 따라서, 두가지 방법을 대체하는 실험 시험설비를 구상하게 되며 철도 선진국에서 도입하거나 설계기술만 도입하고 국내에서 제작 및 단품시험과 종합 시운전을 시행하며 이후에 유지보수 관리 및 폐기에 이르기 까지 일련의 전 공정을 안전 요구사항과 인터페이스를 통하여 설계에 충분히 반영되도록 하기 위하여 요구사항을 분석하고 할당되어야 한다. 표 2에서는 이러한 요구사항 분석과 기능할당 등 관련 시스템 엔지니어링 프로세스와 필요한 입출력요소들을 간략하게 보여주고 있다.

표 2. 철도 시스템의 안전 시험설비 구축 요구사항 분석 및 기능할당

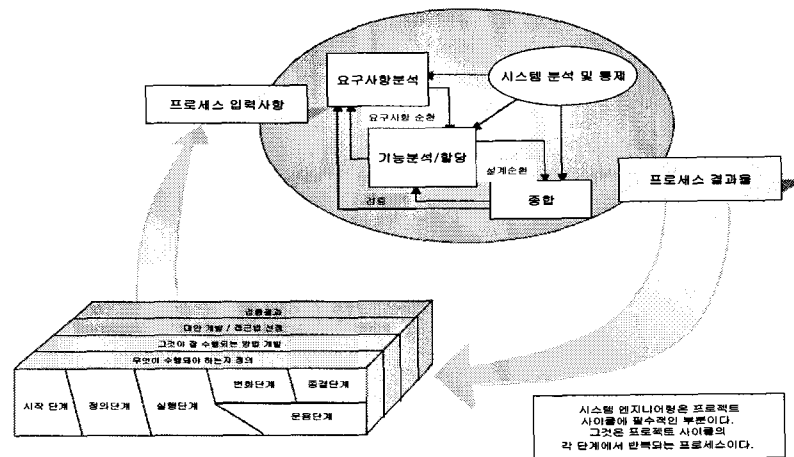
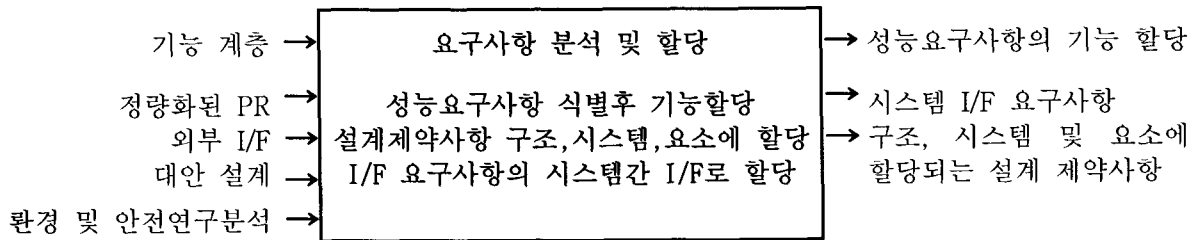


그림 1. 시험설비 구축의 시스템 기능분석/할당 프로그램

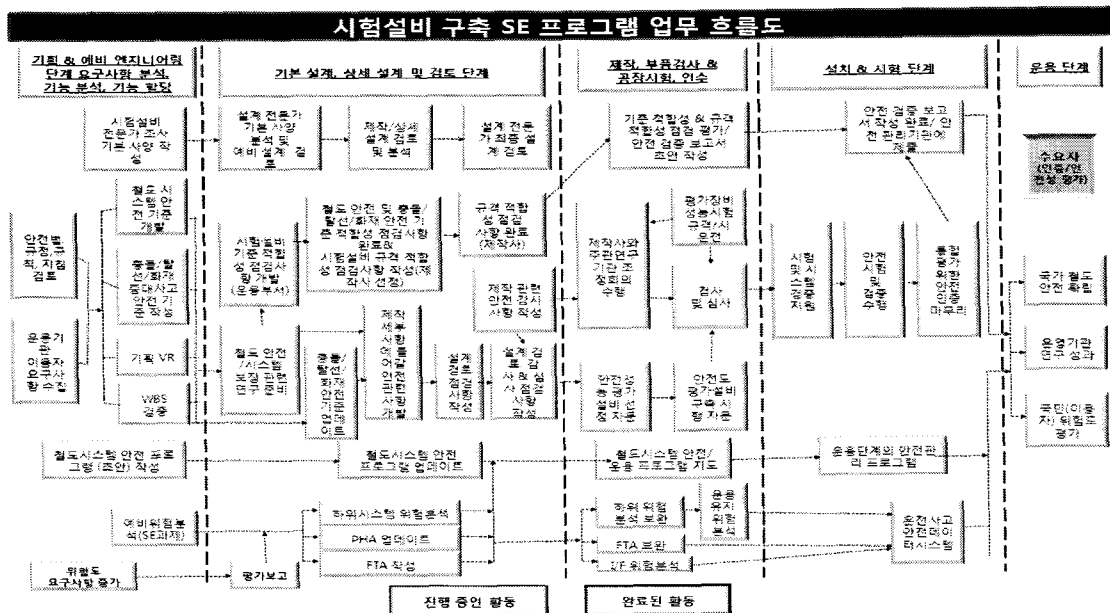


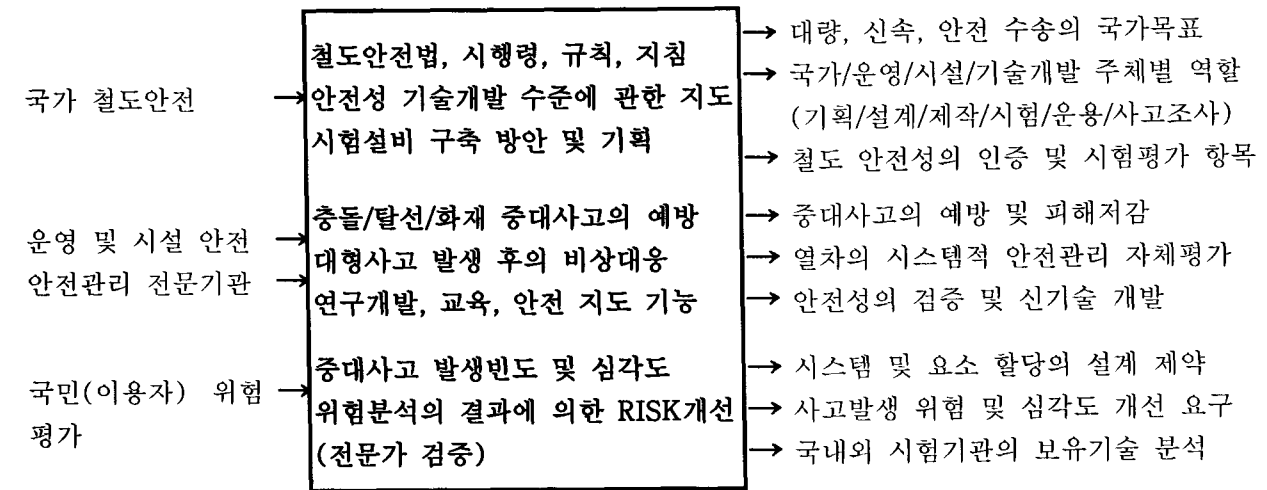
그림 2. 시험설비 구축 SE 프로그램 업무 추진 흐름도

4. 안전성 평가 시험설비 구축 프로그램 및 사양 템플릿

4.1 시험설비 구축 요구사항 기능 분석 및 할당

충돌/탈선 및 화재의 대형 철도 사고를 예방과 피해를 감소하기 위한 시험설비 구축에 필요한 요구사항에 대하여는 가장 우선하여 국가의 국민(이용자)의 안전을 위하여 모든 관계자의 의무사항을 법규로 정의한 철도안전법과 시행령, 규칙, 지침에서 요구되는 사항이 있으며, 철도 운영 및 시설관리 기관이 자체적인 안전관리 사항으로 부단히 안전도를 높이기 위하여 제한하는 사항, 국민(이용자)의 위험도 노출에서 안전성을 높게 요구하는 사항(전문가 활용)의 3개 영역으로 구체화하면 표 3과 같다.

표 3. 철도 안전성 평가 시험설비 구축의 요구사항 기능 분석 및 할당



4.2 기본 사양 템플릿 작성 후 기능분석/할당 수행

충돌/탈선 및 화재사고로 발생하는 대형사고의 안전성을 평가하기 위하여 필요한 시험설비는 다양하게 요구되었으나 요구사항을 기능분석하고, SE기법의 기능할당을 하였으며 절차서는 그림 3과 같다. 기본사양을 작성하기 위한 템플릿 작성과 담당 PM별 기능할당을 수행하였으며, 전문가의 검증을 통하여 정한 시험설비의 요구사항 기능분석은 표 4와 같다.

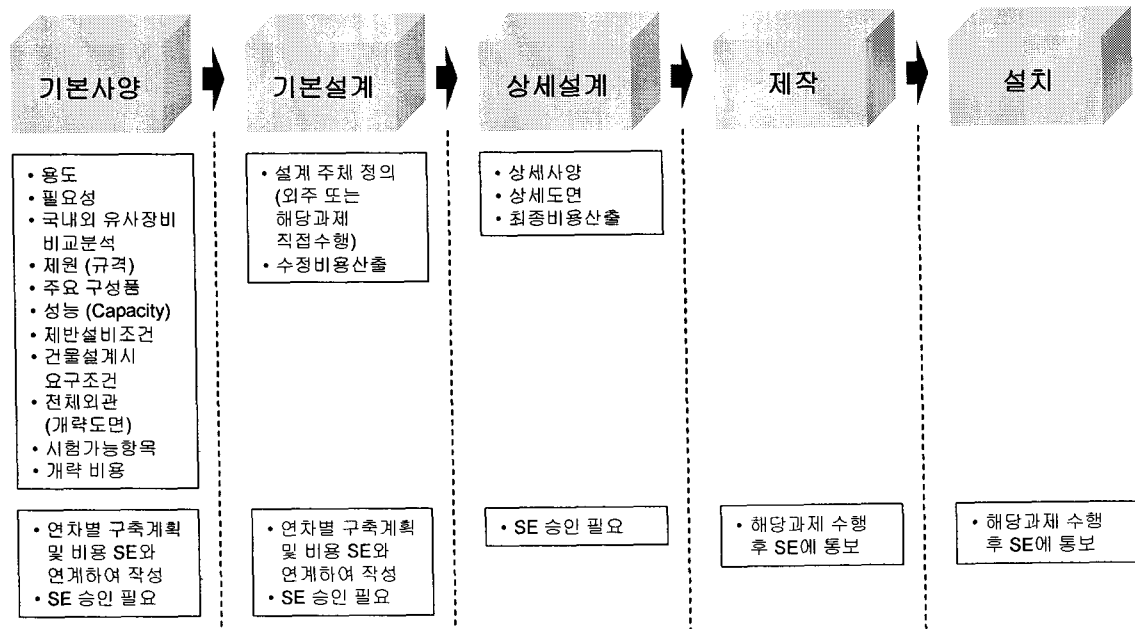


그림 3. 철도안전성능 평가 시험설비 구축 절차 개요

표 4. 안전성능 평가 시험설비의 요구사항 기능분석

PM	기능 장비명	용도	시험항목(S:안전/R:연구/T:인증/Tr:형식)	안전법규/규칙/지침	안전/연구/인증활용(사용빈도x시간, 연간)	국내외 보유 유사 장비 현황	국내 설계/ 제작 기술분석
충돌	차량구조 압괴 안전성 평가 시험설비	-차량차체압괴 변형도 시험 -차체 에너지 흡수 시험 -연결기 등의 고시험 <차체구조물 실물압괴시험평가>	-차체압괴특성 시험 (S/R/T) -충돌안전장치 부품별압괴 특성시험 (S/R/T)	1. 철도차량 안전기준에 관한 규칙(건455호) -제35조(표준충돌사고각본 의방법등 세부고시 (지침의 고시에 시험설비 인프라 구축) 2. 충돌안전장치 부품별 압괴특성시험 -연구개발시에 수시활용	1. 연구기간중 : 2~3회/년 소요(총13회이상) -에너지 흡수능력 시험 (고속 3회, 일반철도 4회, 전동차 2회 이상) -연결기 및 완충차막이 부품시험(각 2회 이상) 2. 연구종료후 -국내발주 6회, 해외2회	1. 국내 : 건기연[용량 부족] 2. 국외 : 연 20억원 시험비 예상 -영국: 정적압괴시험설비 -폴란드 Zmigord CNTK <소형:약10만유로>	1. 외국 : 설계 2. 국내 제작가능 -계측장비도입 및 분석 프로그램개발 *압괴 부자 및 건물
탈선	차량탈선 안전성능 평가 시험설비	-차량탈선 위험도 평가 시험기준 -차량거동변화 탈선위험 시험 -플랜지 진압각별 탈선현상규명 <중합 대형 시험평가>	-철도차량-궤도 상호 적합성 시험(S/R) -차륜/궤도 상호작용력 시험(S/R/Tr) -윤중 횡압 측정 시험(S/R/T/Tr) -탈선계수 규명 시험(S/R/T)	1. 철도차량 안전기준에 관한 규칙(건455호,06/7) -제29조(철도차량과선로 간의작용력등) -제30조(윤중감소량) -제31조(횡압) -제34조(탈선계수) 2. 철도차량안전기준에 관한 지침(07/7고시추진) -탈선계수 측정 및 산정기준(안) 등	1. 사용빈도(3회/년) -1회시험 4개월 소요(준비 2개월) -차량/선로 작용력, 윤중, 횡압, 탈선계수 예측 2. 연구종료후(5회/년) -신차중 3회, -탈선차량 2회	-일본 RTRI: Creep force test bed -일본 RTRI: Wheel-rail contact reciprocating motion unit -미국 TTCI: Vibration Test	1. 외국 : 설계 (국내설계주) 2. 국내 : 제작 불가(제휴) -선진국의 10% 수준 *기준건물 활용(현 대차)
화재	중/소형 철도설비 화재 안전성능 평가 시험설비	-의자,도어등 중화재 평가 -국제기준의 일반 장비 및 소형 시험 성능 시험 -내장재별 화재 특성 평가시험 -중/소형 배기 및 집진설비 <일부노후교체>	-연기발도 시험 (S/R/T/Tr) -가스독성 시험 (S/R/T/Tr) -화염 전파시험(수평 / 직)(S/R/T/Tr) -발열량/발연량 시험(S/R/T/Tr) -산소지수시험 (S/R/T/Tr)	1. 차량화재 안전도평가 -ASTM-E 2061(01), BS 6953(영) -SMT4-CT 96-2136(EU), -NIST6536(01) 2. 철도안전법 시행규칙(건456호,05/7) -제59조(성능시험의 대상 및 기준) -제60조(성능시험의 절차) 3. 철도차량안전기준에 관한 규칙(건455호,06/7) -제 6조(위험도 분석) -제 8조(철도차량의 화재안전 등) -하단 중략-	1. 연구기간중 -연구발도시험외 8항목 : 100회/년 -본사업의 안전도평가용 기조화재 특성시험 2. 사업후 인증용 -안전기준지침, 인증시험 9항 : 200회/년 (연간 빈도 매우 많음) -안전기준 연구개발용 활용 3. 철도소재 화재시험(사례) -’06년 242회(4.0억원) -’05년 600회(6.5억원)	[중형] 1. 호주, 미국, 영국, 스웨덴, 핀란드 등 -롬 코너 SB 2. 국내: 건설기술연구원(설치중) [소형] 1. 국내 : 5개 기관 -방재시험연, -소방경정공사,	1. 외국 : 설계 2. 국내 : 조립 및 도입 -시험시험용 도입 구성 -중형설치조립 경험활용 *기준 건물 활용(의왕시험동)

5. 결론

본 연구에서는 철도에서 발생이 예상되는 대형 사고로서 충돌/탈선 및 화재 사고를 예방하고 피해를 저감하기 위한 안전성 평가를 실증적으로 실시할 수 있는 시험설비에 대한 구축 방안을 SE기법으로 접근하고자 하였다. 필요성과 용도, 시험항목 및 시험방법을 예시하고 향후 활용성에 대하여 면밀한 검토를 통하여 체계적인 구축 방안을 수립하기 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서 대형 시험설비의 구축 시는 충분한 예비검증을 통하여 전문가 자문과 정책 판단이 제시되어야 하며, 단순 기술개발의 요건으로 구축할 경우와 구축 이후의 활용성 및 유지보수도 고려하였고 전체 공정을 체계적으로 시행해야 함을 알 수 있다. 기본 사양뿐만 아니라 설계 및 제작 기술과 성능 검증에 대하여 기본 요구 사양에서 충분히 제시하여 구축되도록 하므로써 대형사고의 안전성 시험평가 기술을 확보하기 위한 적극적인 노력과 선진국의 안전 핵심 신기술을 충분한 연구개발과 동시에 도입하도록 추진함으로써 안전성 평가를 극대화하도록 제안하였다.

본 연구 결과는 철도 안전성 시험설비의 구축에 필요한 다양한 요구사항을 기능분석과 할당을 통하여 바람직한 구축 방안을 제시하였으며, 기능분석으로 충돌/탈선 및 화재 사고를 예방과 피해를 저감하기 위한 안전성능을 평가하기 위한 시험설비를 선정하여 시행하고, 체계적 구축절차서를 따르도록하였다. 이는 설치 후 활용 및 유지보수를 고려한 전주기적 운용방안을 수립하는 데 기여하게 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박찬우외 4인, “철도 충돌탈선 사고 위험도 평가를 위한 사고 진전 시나리오 개발”, 2006.8.18
2. 박영수, 조연옥, 홍선호, “철도안전시스템 아키텍처 모델링을 통한 안전규제 체계화 방안 연구”, 한국안전학회, 2005.10.26
3. 홍선호외 1인, “철도시스템안전 기술트리 체계화 방안에 관한 연구”, 한국안전학회, 2005.10.26
4. UNIFE,UIC,UITP,CER,ARRC and ERRI, “Joint_Strategy_for_European_Rail_Research_2020”, 2001.9
5. Office of Management, Budget and Evaluation, "Systems Engineering and Interface Management",