

철도차량 RAMS 적용에 관한 연구

Study on the Application of RAMS for Rolling Stock

오지은*
Oh, Ji Eun

강찬용**
Kang, Chan Yong

김철호**
Kim, Chul Ho

ABSTRACT

This paper is application of System Assurance(SA) for the rolling stock. As railway systems become more complex, design teams are increasingly under pressure to deliver, design solutions, which integrate both technical and Systems Assurance(SA). Systems Assurance is the application of management methods and analysis techniques to ensure that a design meets Reliability, Availability, Maintainability and Safety(RAMS) criteria. It should be clearly understood that the intent of System Assurance is not just to provide analytical techniques as a metric on performance, but more importantly it should provide a management tool with which to co-ordinate and assure the whole design. System Assurance encompasses the ongoing requirement to consider safety, and RAM through each stage of a Project, from feasibility study through to commissioning and operation. If System Assurance is undertaken properly at feasibility study at the design stages of a Project, the benefits of such analyses can be significant in identifying potential problems early enough for action to be taken before manufacture or installation. At commissioning, RAMS demonstration activities are undertaken to validate the predictive and analytical techniques undertaken during the design.

1. 서론

현대의 철도 시스템은 단순한 수송의 개념을 벗어나 보다 다양한 기능을 요구하고 있다. 이에 따라 철도시스템의 한 구성원인 철도차량 역시 기능이 다양해지고 복잡화함에 따라 고장의 기회는 과거에 비해 더욱 증대되고 있다. 세계적으로 철도 사고는 다른 운송수단에 비해 발생률이 낮지만, 발생시에는 대형 사고로 발전할 가능성이 매우 높아 이를 억제하는 방법에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 철도 사고 통계에 의하면 1842년 이래 89건의 이상의 사고가 100명 이상의 사망자를 발생시킨 것으로 집계되고 있다. 사고원인 조사결과 이러한 철도 사고의 60%가 Human Error에 의해 발생하였으며, 사전 예방이 가능하였던 것으로 판명됨에 따라 최초 철도 시스템의 설계단계에서부터 통합된 시스템 보증(System Assurance) 기술 적용의 필요성이 부각되었다.

이러한 배경을 바탕으로, 선진 국가(영국, 유럽, 북미 및 홍콩)의 철도 시스템 부문에서는 시스템

보증기술 적용을 법으로 규정하고 있으며, 최근에는 규모가 큰 철도 시스템 Project 대하여 시스템 보증을 규정된 국제규격(Euro Norm standard 50126, UK defense standards 00-56, US Military standards 882C and 1629) 따라 수행할 것을 입찰 사양(Tender Specification)에 확대 적용 하고 있는 추세이다. 시스템 보증 기술을 적용하는 방법으로 Project 수행기간 동안 신뢰성(Reliability), 가용성(Availability), 정비성(Maintainability) 및 안전성(Safety)이 확보될 수 있도록 mechanism을 제공하는 접근 방식이 시스템 보증 실행방안으로 활용되고 있다.

본 논문에서는 철도 차량의 시스템 보증 기술 적용 방법에 대해 논의하고, 실제 해외 프로젝트에서 수행한 사례를 소개함으로써 이론에 그치지 않고 실제 적용한 을 실제 적용한 사례를 본 논문은 홍콩 전동차 적용 경험을 바탕으로 한 시스템 보증 기술 적용(Reliability, Availability, Maintainability and Safety) 방안 및 역할에 대한 소개로, 이를 통하여 철도 시스템에서의 시스템 보증 기술에 대한 이해를 돕고자 한다

2. 본 론

2.1 시스템 보증 조직 구조 및 비용

규모가 큰 철도 시스템 Project에는 서론에서 언급한 국제 규격에 일치하는 조직이 구성되어야 하며, 이때 적용되는 전형적인 시스템 보증 조직은 그림 1과 같으며 실제 조직 구성원의 수는 Project 특성에 따라 변동이 가능하다.

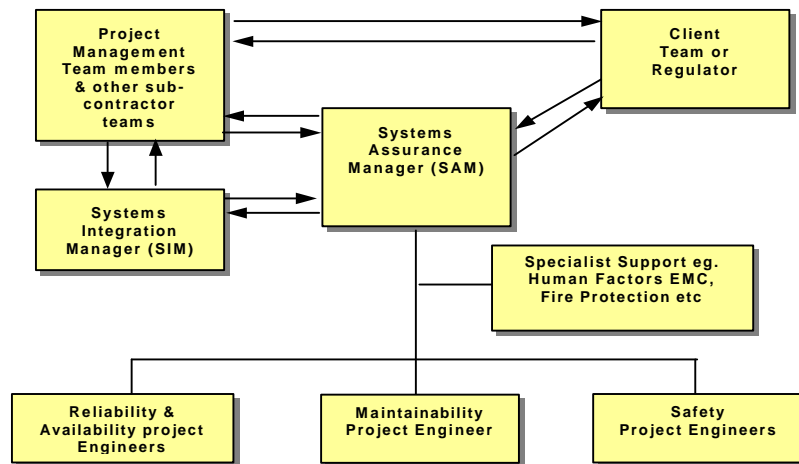


그림 1. 시스템 보증 조직 구조

Project 수행 시 중요한 활동은 시스템 보증 프로세스와 타 시스템과의 interface 사항을 management하는 System Integration Processes 간의 Interface management가 적절히 이루어 져야 한다는 것이다. 이를 위하여, SIM(System Integration Manager)과 SAM(System Assurance Manager)간에는 주기적인 회의 등을 통하여, Project 초기 위험요인(Hazard)구분부터 제거 시 까지 긴밀 상호 협조가 요구 된다. 또한, 성공적인 시스템 보증업무 수행을 위해서는 적합한 능력을 갖춘 충분한 인력 확보가 주요 관건으로, 시스템 보증업무 비용은 전문가 고용을 위한 Project 비용뿐만 아니라, 내부 팀원 비용 및 sub-contractor의 시스템 보증업무 비용 까지 포함을 하여야 한다.

도표 1. 프로젝트별 시스템 보증 비용

Estimated Value of Project (UK GBP)	Estimated Value of Systems Assurance (UK GBP)	% of Project Cost	Example Projects for benchmarking
1 Million	50 K	5%	Minor infrastructure or rolling stock Modifications
10 Million	300 K	3%	A ticketing system
50 Million	500 K	1%	A new railway depot
450 Million	2 M	0.4%	A new rolling stock project
1500 Million	10 M	0.7%	First part of a new high speed railway link
2800 Million	20 M	0.7%	New underground railway system in UK
1000 Million	10 M	1%	New underground system overseas

표1 은 영국에서 최근의 철도 시스템 project 수행 시 System Assurance로 소요된 비용을 추정 한 것으로, 소규모 Project의 경우 평균 사업비의 1~5% , 대규모 Project의 경우 사업비의 0.4 ~1%가 소요 되는 것으로 추정되어 진다.

2.2 적용 절차 및 방법

그림 2는 프로젝트 Life Cycle동안 이루어지는 시스템 보증 활동을 나타낸 것으로, 전체적으로 4단계로 구성되어 있으며, 단계별 수행 내용은 다음과 같다.

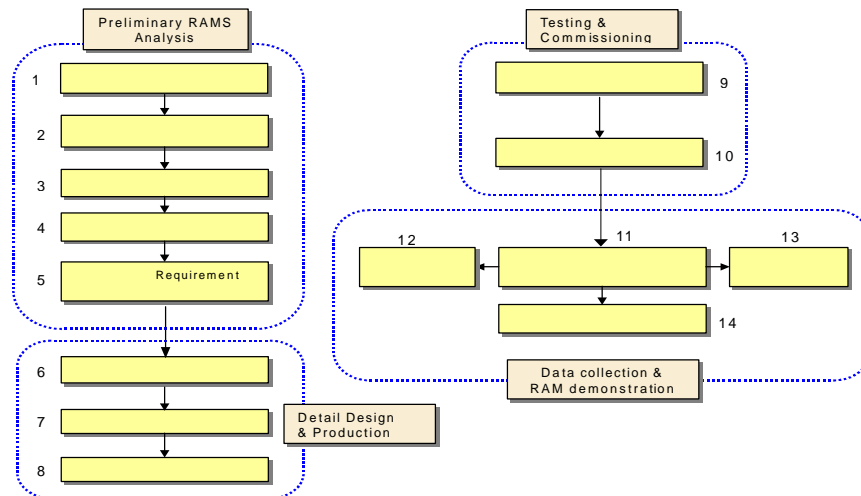


그림 2. 프로젝트 수명주기 동안의 시스템 보증 활동

- Preliminary RAMS Analysis Stage

예비 RAMS 분석 단계로, 시스템 보증 적용 방법에 대한 방안과 달성 하고자 하는 RAMS 목표 설정을 목적으로 분석을 실시하게 된다. 이 단계에서는 시행청 공고 사양상의 요구조건을 기준으로 기 수행 Project의 경험과 시스템별 적용 및 요구 조건을 고려, 위험요소(Hazard) 규정 및 신뢰도, 정비도 예비 분석을 실시, 시스템 특성에 맞는 RAMS 요구사항을 설정하게 된다.

이때 설정된 시스템별 요구사항은 시행청 및 Sub-contractor와의 협의 하에 결정되며, 이는 상세 설계 과정에서 RAMS 측면에서의 설계 적합성 검토 시 그 평가 기준으로 활용 된다.

- Detail Design & Production Stage

예비 RAMS 분석단계에서 확정된 시스템별 요구사항의 설계 분석단계로, Safety 와 RAM으로

분류되어 상세 분석이 이루어지며 RAMS 분석의 대부분이 이 단계에서 행하여진다.

Safety에 대한 활동으로는 설계 개념 및 근본적인 위험요소(Hazard) 발생 가능 원인에 대한 문제점을 검토하고, 예비 위험 분석(Preliminary Hazard Analysis), 예비 고장모드 분석(Preliminary Failure Mode Effects Analysis) 및 HAZOP's(Hazard and Operability studies)를 실시하여, 잠재적인 위험요소(Potential Hazard)를 결정 한다 잠재 적인 위험요소에 대한 저감 방안 도출을 위하여, 위험 요소특성에 따라 SSHA(Sub-system Hazard Analysis), IHA(Interface Hazard Analysis), O&SHA(Operation and Support Hazard Analysis) 및 FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis)등 상세 정성적인 분석(Qualitative Analysis)실시 하게 된다. 정성적인 분석 후, 그 위험 정도에 따라 정량적인 분석을 실시하게 되는데 이러한 분석 과정을 Quantitative Risk Analysis라 하고, Fault Tree 와 Event Tree Analysis를 적용한다. 또한, 분석 과정에서 얻어진 위험 요소 저감 방안은 설계 단계 반영 및 제작, 시험 및 시운전시 시험을 통하여 그 유효성이 입증 되며, 그 결과는 Hazard Log에 유지 관리가 되어 차량의 안전성을 입증하는 자료로 사용 된다.

RAM 분석으로는 예비 RAM 분석 과정에서 할당된 신뢰도와 정비도에 대한 분석 단계로, 장치/부품의 고장률(Failure Rate) 및 정비 시간(MTTR)에 대한 상세 분석이 이루어진다. 전동차 구성 부품을 장치별로 LRU(Line Replaceable Unit)단위 까지 Break Down 하고, 각 부품별 고장률 및 정비 시간에 대한 데이터를 수집하여 데이터베이스를 구축하며, 이를 바탕으로 철도 차량의 신뢰도 및 정비도 Performance를 예측, 공고 사양상의 요구사항의 달성 여부를 분석 하게 된다. 이러한 분석 과정을 통하여 철도차량의 신뢰도 Performance에 영향을 줄 수 있는 Reliability Critical Item을 구분하여, 부품/장치 시험 과정에서 그 신뢰성에 대한 검증을 실시하거나 또는 설계 개선을 유도하게 되며, 아울러 철도차량 정비 계획 작성 시에도 참고 자료로 활용이 된다.

- Testing & Commissioning Stage

시운전 단계로, 설계 단계에서 반영된 위험요소 저감 방안의 유효성 입증 및 장치/부품의 신뢰도 및 정비도 Performance 데이터를 수집하여, 분석 단계의 결과와 상호 비교, 신뢰도 성장(Reliability Growth)을 위한 개선 방안 설정을 하게 된다. 설계 오류로 인한 Pattern Failure 발생 여부 검증 및 각종 Failure를 FRACAS(Failure Reporting And Corrective Action System) 원칙에 의한 분석 및 대책 수립으로 철도차량 신뢰도 Performance의 향상을 수행하게 된다.

- Data collection & RAM demonstration

철도차량 영업 운행 데이터 및 유지 보수시의 정비 내역을 활용하여 RAM 특성을 분석 하는 단계로, 고장 및 이로 인한 보수 정비(Corrective Maintenance)내역 과 예방 정비 내용(항목 및 Interval)의 유효성을 분석, 그 결과가 설계 단계에서의 RAM 특성 Prediction 결과 및 시행청 공고 사양상의 RAMS 요구사항 만족 여부를 입증 하게 된다.

철도차량 RAM Performance의 공식 측정은 영업 운행 개시 후 일정기간의 안정화 기간 경과 이후 시작되는데, 이는 운행 조건이 시운전 단계에서는 경험하지 못하였던 승객 운송, Platform duty cycle 수행, 신호 장치와의 Interface 및 차량 운영자의 숙련기간 필요 등을 고려한 것으로, 통상적으로 6개월의 기간이 소요 된다.

RAM Demonstration 기간은 철도차량 안정화 이후 12개월 동안 측정하며, 철도차량 Performance 데이터는 월 단위로 집계 하여 철도차량 RAM performance 추세, 문제점 및 개선책의 유효성을 분석 한다. Demonstration 기간 내에 RAM 목표 달성 시 Demonstration은 종료하게 되며, 달성 하지 못할 경우에는 기간 연장 또는 시행청과의 협의에 따라 향후 진행 방향을 합의한다. RAM demonstration 과정에서 얻어진 RAM data 종합 분석 결과는 시행청에 제공되어, 향후 시행 청 차량 운용 계획 작성 시 참고 자료로 활용 된다.

2.3 System Assurance 적용시의 이득

앞에서 설명한 바와 같이 시스템 보증은 기존에 접하지 않았던 새로운 절차와 분석을 요구함으로써, 적용 과정에서 시스템 보증 적용시의 이득이 무엇인가라는 질문에 자주 접하였으며, 이에 대한 답변으로 시스템 보증의 4가지 측면인 신뢰도, 가용도, 정비도, 안전성 관리의 적용 시 이득을 정리하고자 한다.

- **Reliability**

신뢰성 측면에서의 이득은 두 가지로 나누어 질 수 있다. 첫 번째로 설계가 신뢰성을 가지고 있다면 그것은 모든 열차운행은 Timetable에 따라 정확히 운행 하게 되어 이는 신뢰성 있는 영업 운영을 가능하도록 한다. 두 번째로는 신뢰성이 확보된 부품/장치는 전체 Life Cycle Cost 비용을 감소시키고, 효율적인 system 설계에 따른 Cost 절감을 가능하게 한다.

- **Availability**

우수한 가용성 유지는 열차의 Downtime을 최소화 시켜 줌으로써, 열차 운용의 효율성을 향상시켜 승객에게 열차 운행의 신뢰성을 제공하게 한다

- **Maintainability**

정비성 분석은 철도 시스템 유지 보수 시의 안전 위험 요인들을 최소화 할 수 있도록 하는 Tool을 제공하여 주고, 설계 초기에 적합한 정비성 분석을 통한 유지 보수 (Preventive and Corrective Maintenance) 소요 Life Cycle Cost 예측 및 최소화를 가능하게 한다.

- **Safety**

Safety Assurance는 설계 시 위험 요인 저감 방안이 실행 가능한 범위 내에서 합리적으로 모두 적용 되었다 것을 명확하게 입증 해주길 원하는 시행 청 검토자의 요구를 만족 시킨다. 또한, 운전자에게는 합리적으로 예견되는 사고의 잠재적인 원인이 고려되었고 보다 안전한 차라는 신뢰감을 제공한다.

2.4 System Assurance 적용 사례

- . Safety (안전성)
- Risk Assessment

도표 2. 위험도 평가표

		CONSEQUENCE						
		7 Trivial	6 Negligible	5 Marginal	4 Serious	3 Critical	2 Catastrophic	1 Disastrous
Fatalities					<5	5-50	51-500	>500
Major Injury					<5	5-50	51-500	>500
Minor Injury				<5	5-50	51-500	>500	>500
System Disruption			<20 min	few hours	1 hour	1 day	1 week	1 month
Line Disruption			20-60min	few hours	1 day	1 week	1 month	few months
Station Disruption		<20min	few hours	1 day	1 week	1 month	few months	1 year
F	A ≥ 100 /year	Ar	Un	Un	Un	Un	Un	Un
R	B $\geq 10 - < 100$ /year	Ac	Un	Un	Un	Un	Un	Un
E	C $\geq 1 - < 10$ /year	Ac	Ud	Un	Un	Un	Un	Un
Q	D $\geq 0.1 - < 1$ /year	Ac	Ar	Ud	Un	Un	Un	Un
U	E $\geq 1E-2 - < 1E-1$ /year	Ac	Ar	Ar	Ud	Un	Un	Un
E	F $\geq 1E-3 - < 1E-2$ /year	Ac	Ac	Ar	Ar	Ud	Un	Un
N	G $\geq 1E-4 - < 1E-3$ /year	Ac	Ac	Ac	Ar	Ar	Ud	Un
C	H $\geq 1E-5 - < 1E-4$ /year	Ac	Ac	Ac	Ac	Ar	Ar	U4
Y	I $\geq 1E-6 - < 1E-5$ /year	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ar	Ar
	J $< 1E-6$ /year	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ar

상기 표는 Military Standard 882 및 홍콩 전동차가 수십 년간 운행 경험을 바탕으로 철도차량에 맞게 customize된 것으로, 각 상황별로 정량적으로 정의가 되어 있어, Risk 평가를 하는데 보다 효율적 이다.

- Design Change

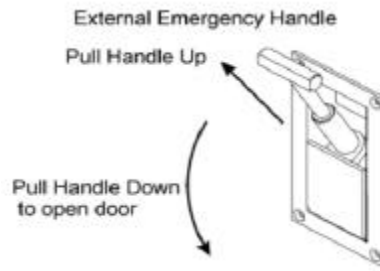


그림 3. 설계 변경

상기 예는 비상시에 사용되는 비상 출입문 핸들로써, 운전자나 혹은 Vandalism 으로 인해 비상 출입문 핸들이 펼쳐진 상태에서 차량 운행시 차량한계나 Track Side 장치 한계를 침범할 우려가 있어, 비상 출입문 핸들을 잡아 당기고 놓으면 Telescopic 형태로 핸들이 원상태로 복귀하게 설계 변경이 된 예이다.

- 신뢰성

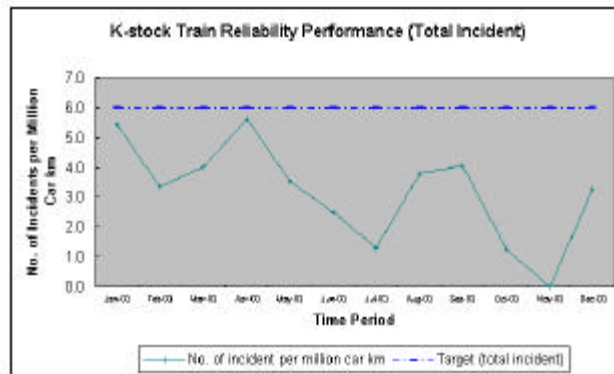


그림 4. 홍콩 전동차 신뢰도 추이

상기 그림은 1,000,000 car km 당 차량 운행에 영향을 미치는 고장이 6건의 홍콩전동차 신뢰성 요구 조건(통상 Mean Distance Between Failure (MDBF)로 통용되며, 위 조건을 MDBF로 환산하면 166,666 car km로 선진국의 차량에서 주로 요구되는 신뢰성 요구조건임)을 입증하기위해 2003년 1월부터 동년 12월 31일까지 FRACAS(Failure Report And Corrective Action System)를 통하여, 고장 자료를 수집, 고장원인을 분석하고 관련 요구조치를 취하였으며, 그에 대한 결과 요구되는 신뢰성 요구조건 보다 실제 신뢰성 성능 결과가 훨씬 좋음을 입증하였다.

- 정비성

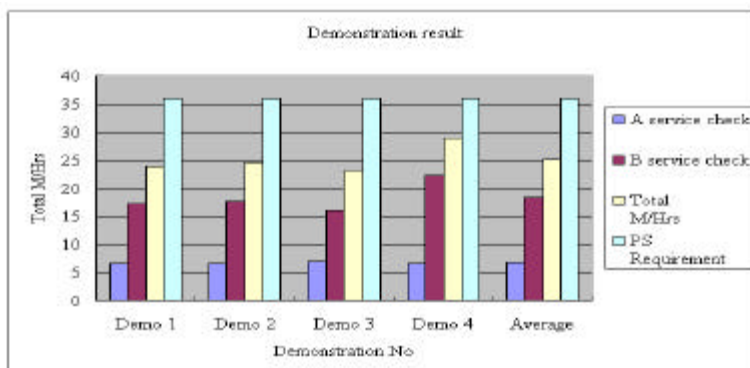


그림 5. 홍콩 전동차 정비성 입증 결과

위의 그림은 홍콩전동차에서 요구한 정비성 요구조건, 예방정비 와 보수정비 요구 조건중 예방 정비 요구조건의 입증결과로, 4번의 예방 정비를 수행하여 요구되는 소요 Manhour를 만족하였음을 보여 주고 있다. 또한, 이 결과는 홍콩전동차가 예측하였던 예방 정비로 인하여 소비되는 비용이 줄

어 들 수 있음 을 보여 준다.

- 가용성

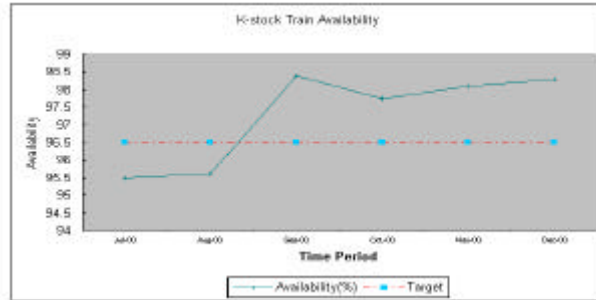


그림 6. 홍콩 전동차 가용도 추이

위 그림은 2003년 7월부터 12월까지 6개월 동안 수행되었던 가용성 검증결과가, 요구된 가용성 요구조건을 만족하였음을 보여준다. 가용성은 신뢰성과 정비성에 의하여 결정되며, 이 가용성의 결과에 따라 시행청의 차량운용 계획을 수립하는데 중요한 정보가 된다.

3. 결 론

현재 국내 철도시스템 분야에서 시스템 보증 기술의 적용은 시작 단계로, 많은 연구와 기술축적을 필요로 할뿐 아니라 체계적인 정착까지는 상당 기간이 소요되리라 예상된다. 시스템 보증 기술의 적용이 처음 도입된 홍콩 전동차 적용 과정에서 발생한 주요 문제점으로는, 철도차량 지식을 보유한 RAMS 전문 인력의 부족 및 이로 인한 부적당한 전문인력 투입 시점, System Integration과 System Assurance과정간의 취약한 Interface, 정성화된 위험 요소 및 신뢰성 데이터 부족 및 Sub-contractor의 RAMS 분석 능력 부족 등을 들 수 있으며, 이러한 문제점들은 앞으로 시스템 보증 기술의 철도 시스템 정착을 위해서 반드시 해결해야 할 과제이다. 이러한 문제점들을 해결하고 성공적인 시스템 보증 업무수행을 위한 해결 방안의 첫 단계로 올바른 계획수립 과 설계자가 포함된 전문 인력 양성이 필요 한 것으로 판단된다.

해외수출 차량의 시스템 보증 기술 적용은 입찰 사양에 기본 요구사항으로 명문화 되어 있고 그 적용 범위 또한 확대 되는 추세이므로, 해외 철도 시스템 시장 진출을 위한 시스템 보증 기술력 축적 필요성 및 향후 예상되는 국내 철도 시스템 분야의 시스템 보증 적용 요구에 효과적으로 대응하기 위한 대비가 필요한 시점으로 생각된다.

시스템 보증 기술은 점차로 증가하고 있는 철도 시스템의 복잡성 및 안전과 전체 수명 주기 비용 경제성 논리에 따른 최적화 방안 도출 시 핵심적인 역할을 담당할 것으로 판단하며, 시스템 보증 기술의 조기 정착 및 활성화를 기대한다.

참고문헌

- 1.Elms D, Rail safety, Reliability and System Safety, vol.74 No.3, 2001.
- 2.EN50126, Railway Applications The specification and demonstration of Reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), CENELEC, 1999.
- 3.Haile JP, Quantified Risk Assessment in Railway System Design and Operation, Quality and Reliability Engineering International, vol. 11 No. 6, 1995.
- 4.MIL-STD-2155, Failure Reporting Analysis and Corrective Action System, Department of Defense, 1985.
- 5.MIL-STD-721C, Definition of Terms for Reliability and Maintainability, Department of Defense, 1981.
- 6.MIL-STD-882C, System Safety Program Requirements, Department of Defense, 1993.
- 7.RAM Demonstration Report for MTRC, 2004