

RAMS 조건 및 평가

2015. 11. 7

김종운

(한국철도기술연구원)

목 차

1. RAMS 관리 개요
2. RAMS 목표 및 요구사항 관리
3. 신뢰성 목표 할당 및 예측
4. 정량적 RAMS 요구사항 설정

1. (Systematic) RAMS 관리 개요

RAMS 란 무엇인가?

RAMS

신뢰성, 가용성, 유지보수성 및 안전성을 총괄하여 나타내는 두문자어.
(IEC62278)

Reliability

고장 발생 횟수가 얼마인가.

Availability

주어진 공용 차량상에서 운용되는 시스템은 몇 개인가.

Maintainability

시스템 복구에 걸리는 시간은 얼마인가.

Safety

리스크와 관련된 고장은 어떻게 정의되는가.

철도 서비스의 속성(요구사항)

고객구분	번호	요구사항 항목
고객 (승객 등)	1	안전
	2	서비스 빈도 및 시격
	3	일정 및 시격 준수도 (정시성)
	4	철도차량 디자인 매력
	5	이동시간 (대기시간 포함)
	6	편안함 (승차감, 승차소음, 청결 등)
	7	편리성 (역사 설비, 승하차 등)
	8	타 교통시스템과의 연계성
	9	요금구조
운영자	10	가용성
	11	수송량 (승객 및 화물)
	12	시스템 유연성
	13	경제성
공공	14	환경 영향 (소음, 오염, 진동 등)
	15	구조적 영향
	16	시스템 이미지 및 평판

철도서비스의 KPI

COMET & NOVA KPI

성장, 습득 & 혁신

- G1a/b %의 변화율. 네트워크 규모 & 승객 여행
- G2a/b %의 변화율, 운전 능력(km) & 차량 운행 거리(km)
- G3 운행시간 / 1000 명의 직원이 근무하는 시간
- G4 무료운임제에 따른 기업 수익 / 유료 운임제에 따른 수익

고객

성장, 습득 & 혁신

- C1 운전 거리(km) km /노선길이(km)
- C2 승객 여행 거리(km) /운전 거리(km)

서비스 수준

- C3 승객 탑승 시간 지연 / 승객 여행시
- C4 정시 지하철의 승객 이용 / 승객 여행시
- C5 정시 출발, 정지하는 열차 / 총 열차 수
- C6 Train Hours Operated / Hours of Train Delay

안전성

- S1 총 치사율 / 승객 여행시
 - S1a 자살로 인한 사망 / 승객 여행시
 - S1b 사고사 / 승객 여행시
 - S1c 불법 행위로 인한 사망 / 승객 여행시
- S2 범죄 사고 / 승객 여행시
- S3 사고 중 직원이 허비하는 시간 / 직원 근무 시간

내부 과정

신뢰도 & 가용성

- P1a/b %라는 피크 시간에서의 차량 이용율.
- P2a/b 차량 운전 거리(km) / 사고 간격 시간(종류별)

효율성

- P3 승객의 여행 / 직원 + 계약업체 업무 시간
- P4a/b 운전 능력 & 차량 운행 거리(km) / 직원+ 계약업체 근무 시간
- P5 열차 운행 시간 / 운전자 근무 시간
- P6 %의 직원 결근률
- P7 소모된 견인 에너지/차량 운반 거리(km)
- P8a/b 소모된 총 에너지 / 승객 여행시 & km

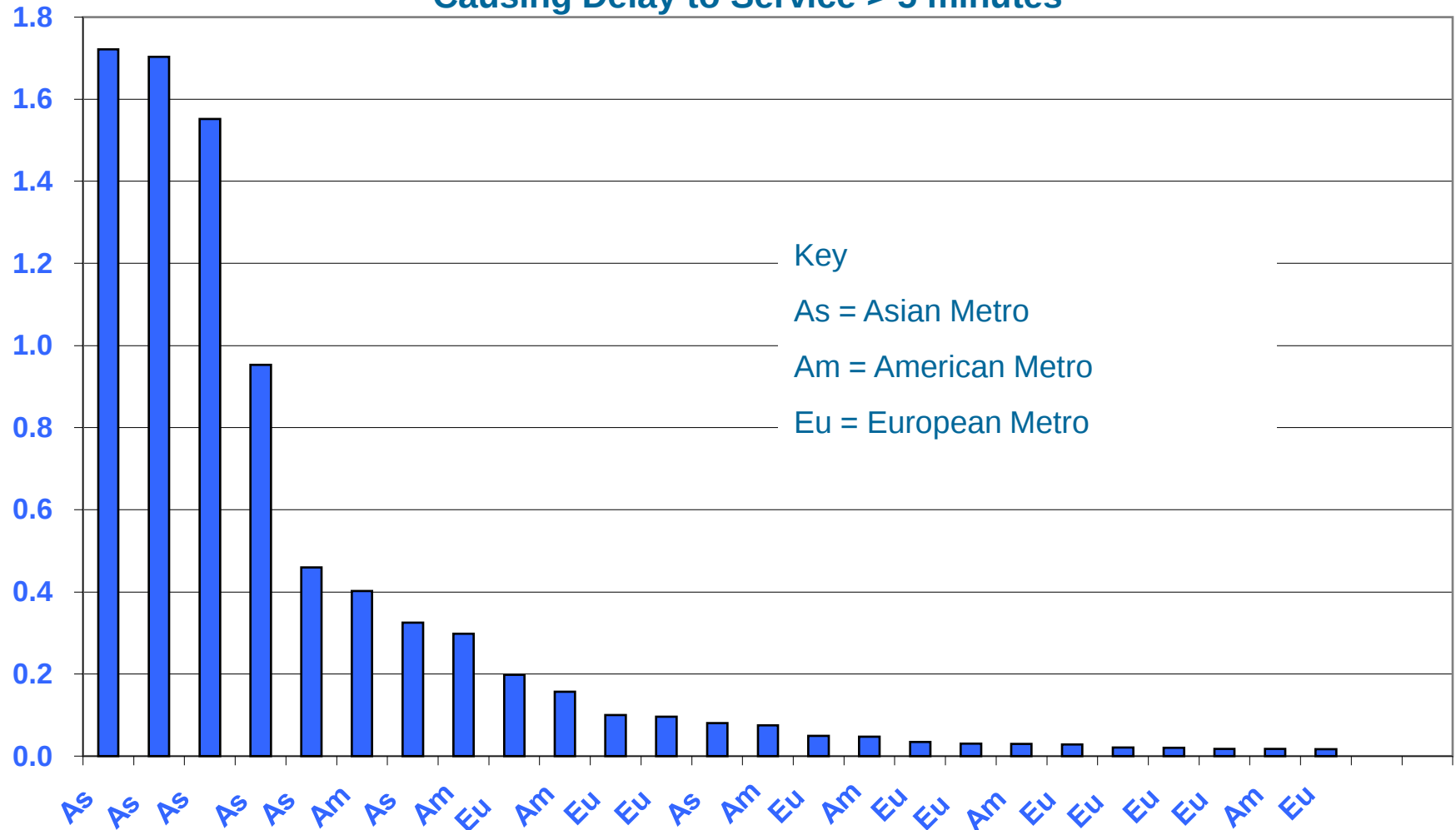
재정

- F1 총 기업 수익/ 운행 비용
- F2 운행 비용/수익--- 차량 운행 거리(km)
 - F2a 서비스 제공 비용/차량 운행 거리(km)
 - F2b 유지보수 비용/ 차량 운행 거리(km)
 - F2c 관리 비용/차량 운행 거리(km)
- F3 투자 비용/ 차량 운행 거리(km)
- F4a/b 운행 비용/승객 여행 & km,
- F5a/b 운임으로 인한 수익 /승객 여행시 & km

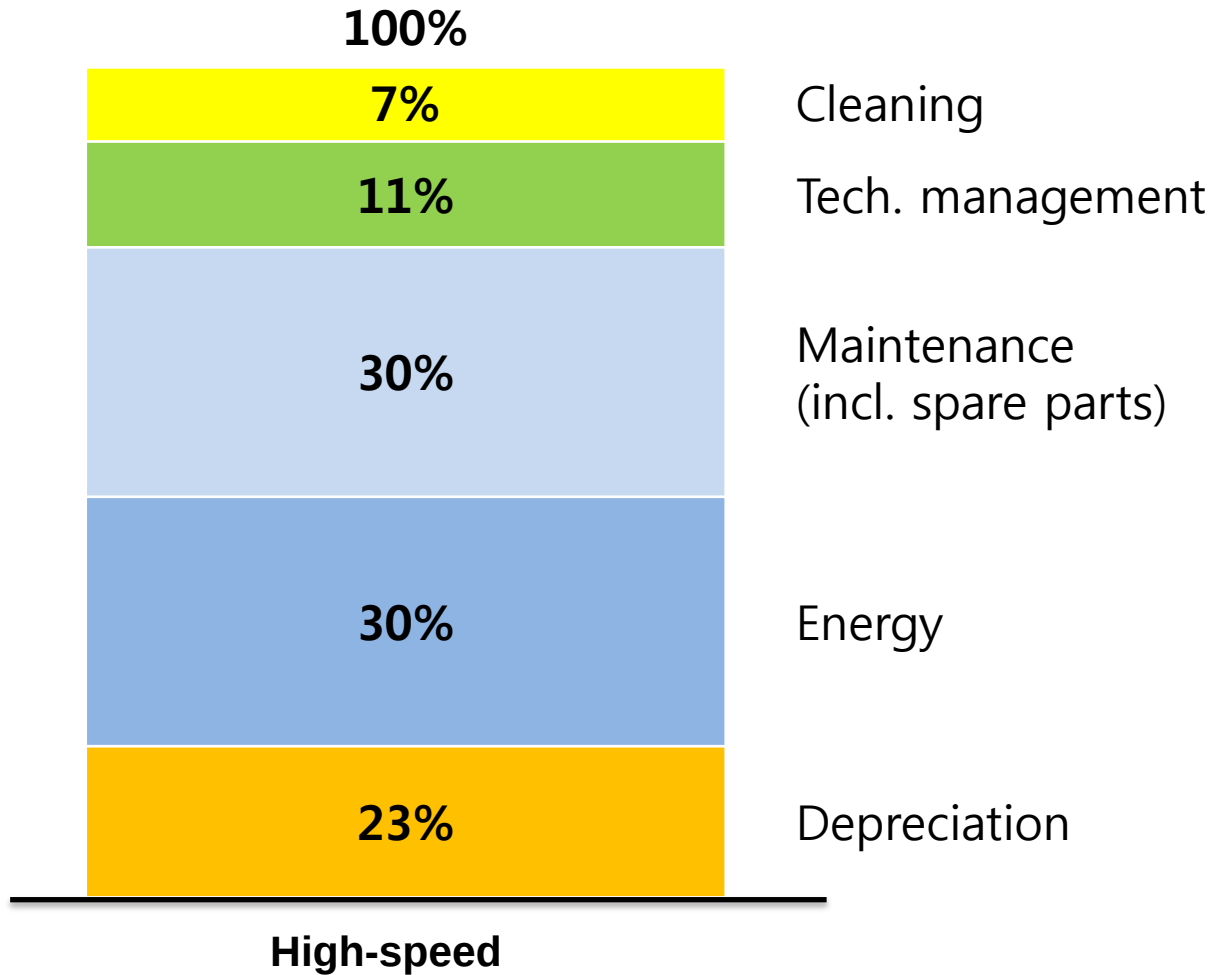
CoMET의 KPI 평가 사례

Million Car Kilometres Between Incidents , 2006

Causing Delay to Service > 5 minutes



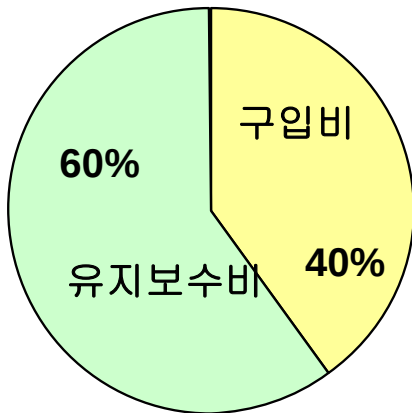
수명주기비용(고속차량)



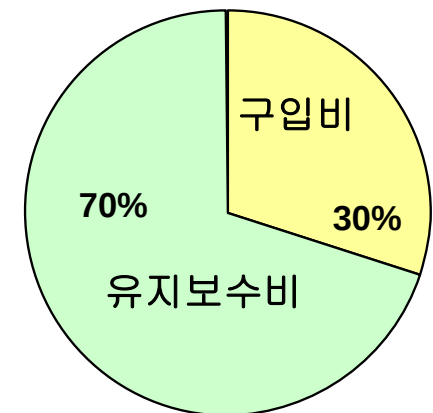
[출처: Oliver Wyman]

철도차량의 구입 vs 운영/유지보수비

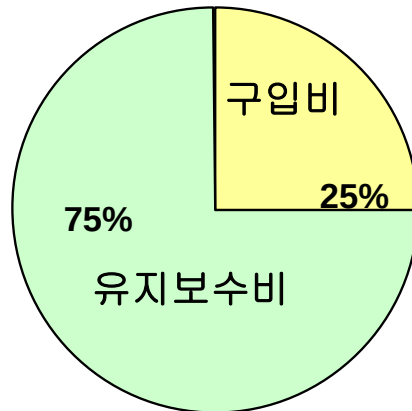
전기 기관차



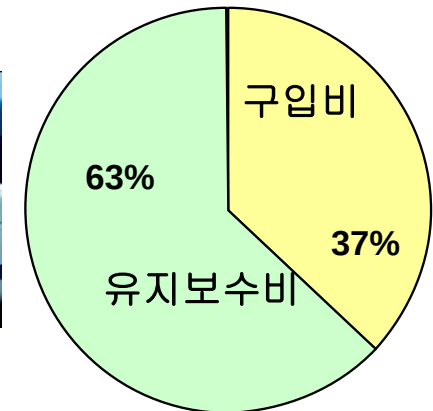
디젤 기관차



West Coast Main Line VIRGIN - ALSTOM

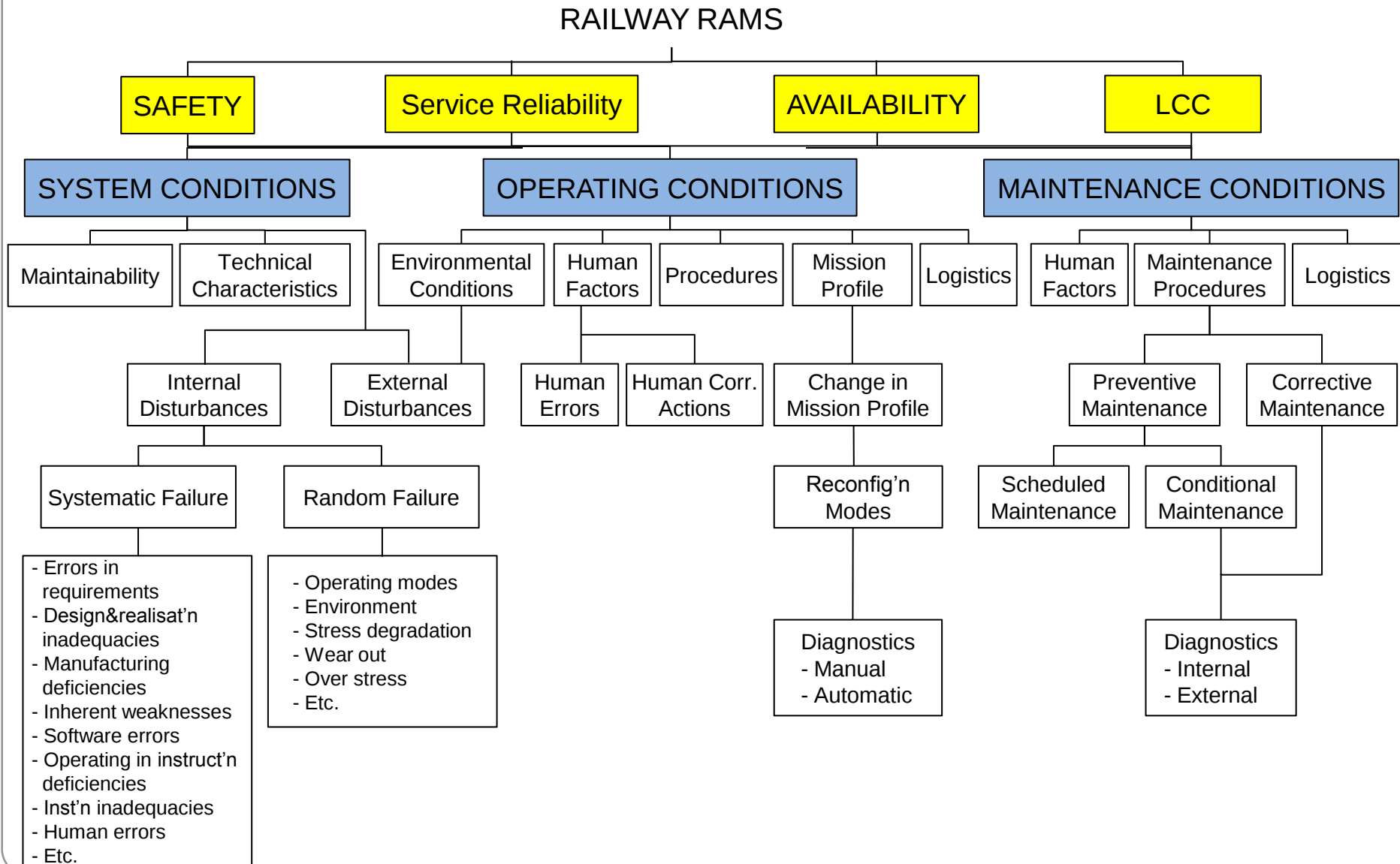


TGV RENFE - SIEMENS

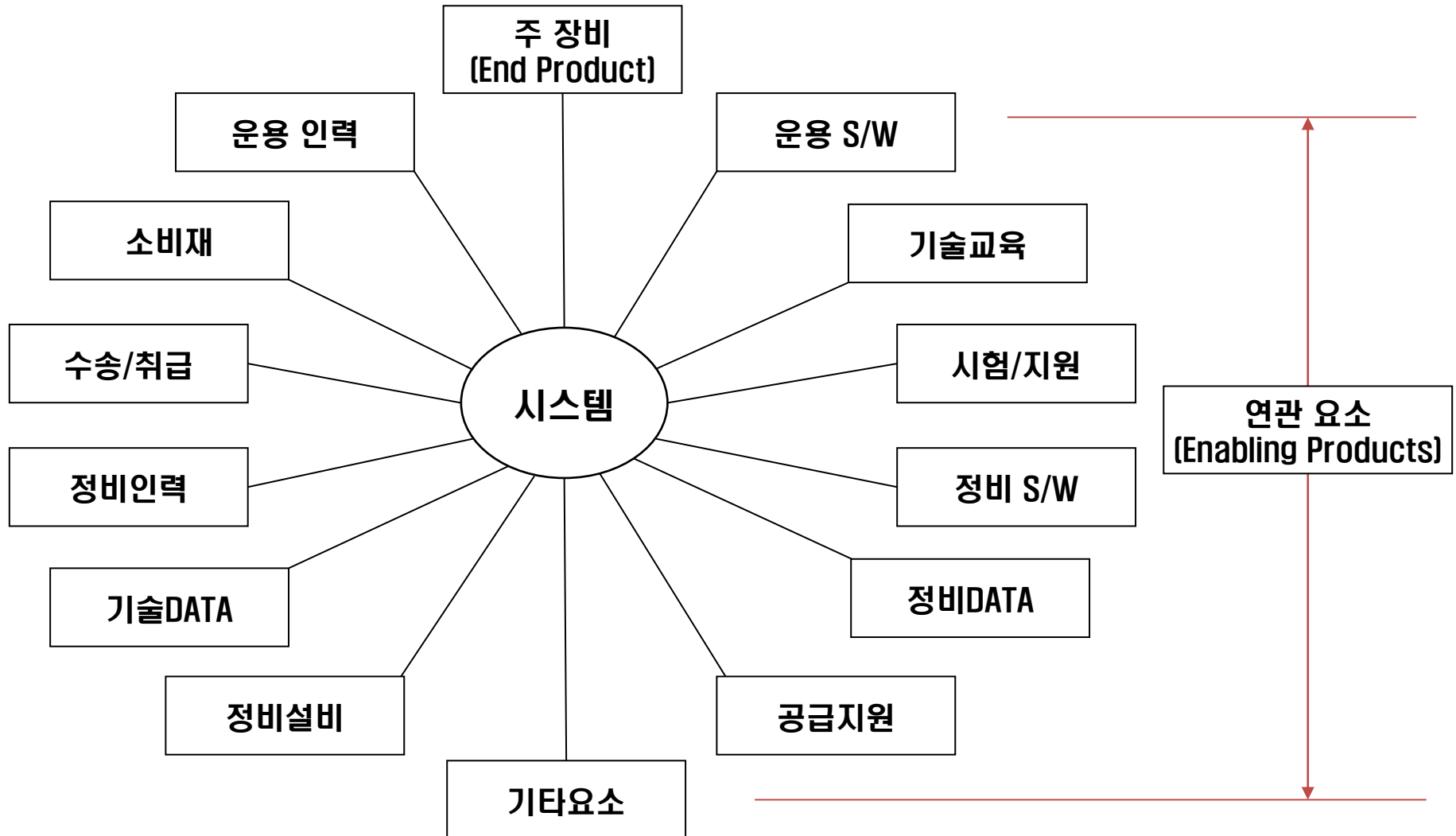


출처: Reducing rolling stock maintenance cost, Louis-Marie CLEON, SNCF

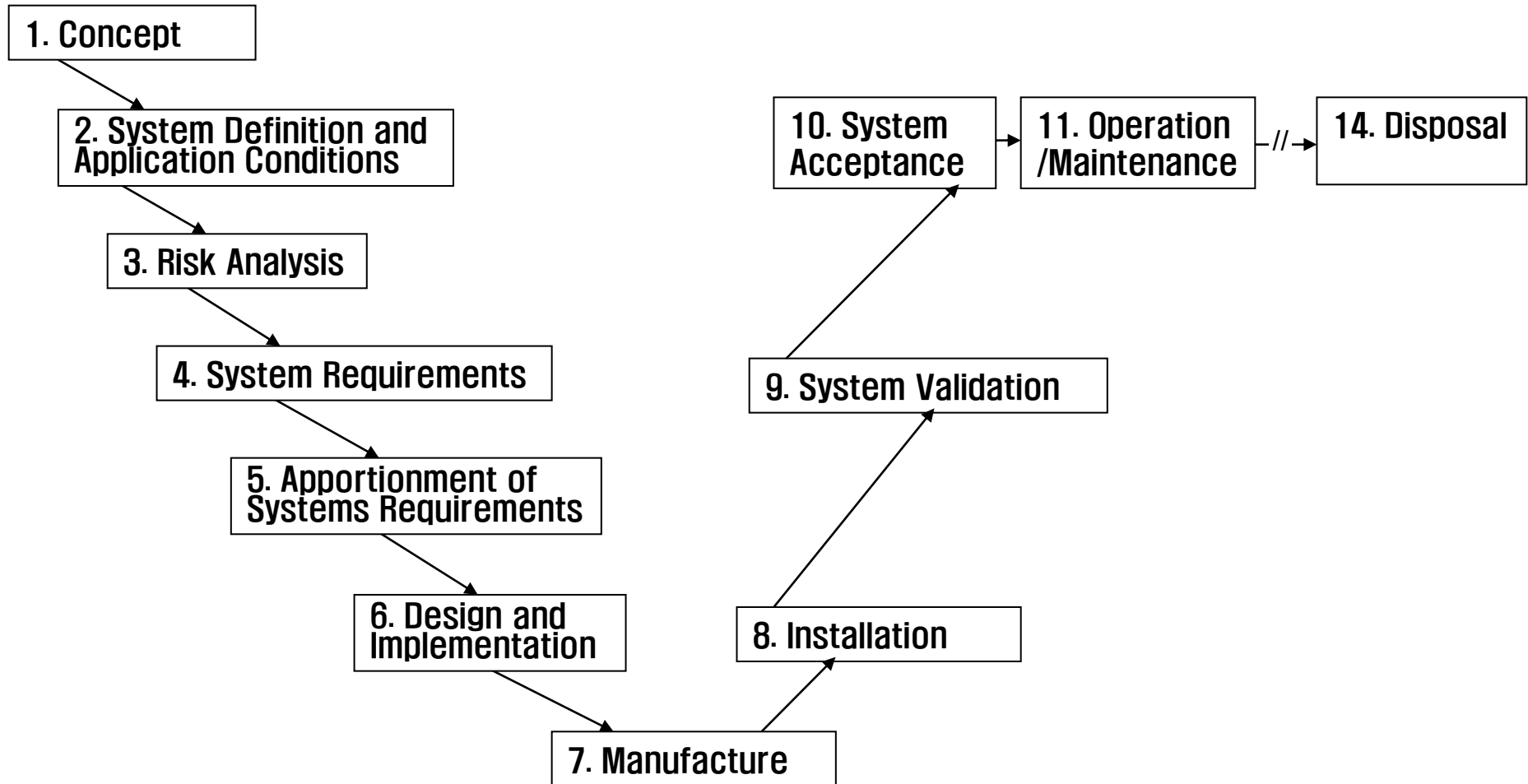
철도 RAMS 에 영향을 주는 인자



시스템 구성요소



시스템 수명주기



링겔만 효과(Ringelmann effect, 1913)

집단속에 참여하는 개인의 수가 늘어날수록 성과에 대한 1인당 공헌도가 오히려 떨어지는 현상 (줄다리기)

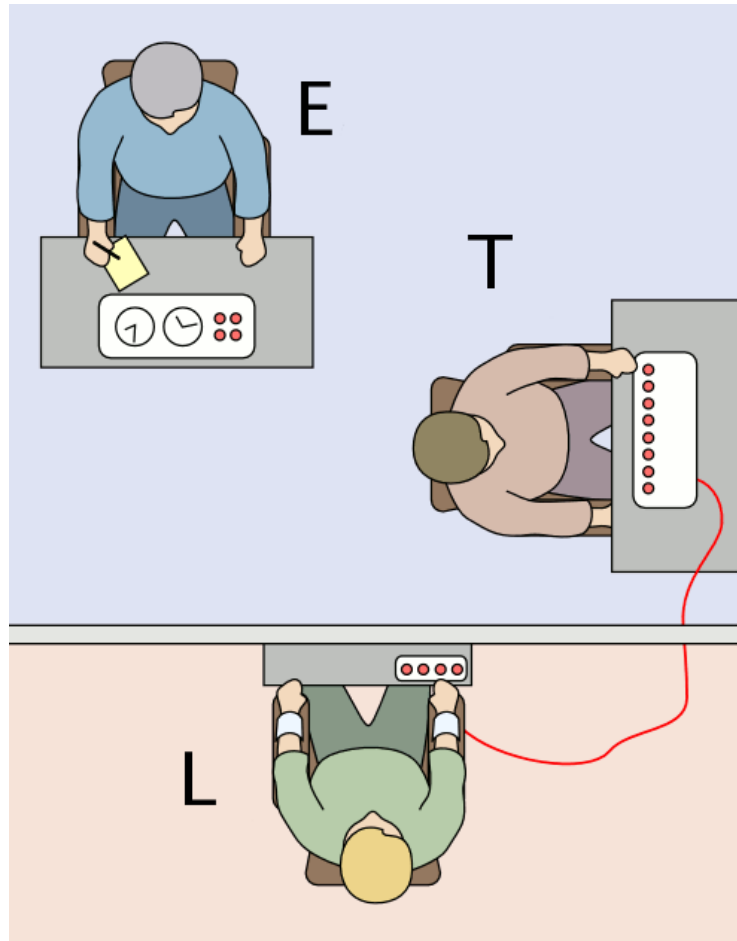
- 2명: 93%, 3명: 85%, 8명: 49%

방관자 효과(Genovese syndrome, 1964)

목격자가 많을수록 책임감이 분산돼 개인이 느끼는 책임감이 적어져 도와주지 않고 방관하게 되는 심리현상

- 책임의 분산: 내가 아니어도 다른 사람이 있다는 생각 때문에 책임이 분산되고
- 평가의 우려: 내가 도우러 갔는데 만약 아무일도 아니었을 경우 수치심이 들게되고
- 다수의 무지: 다른 사람이 돕지 않는 것으로 보와 그 상황이 도움이 꼭 필요한 상황은 아닐꺼야

밀그램 실험 (Milgram Experiment, 1961)





출처: 김대식 '브레인스토리'

RAMS (공학) 이란 ?

RAMS (공학)

높은 안전성, 서비스 신뢰성과 가용성을 가지면서도 낮은 수명주기비용을 가진 시스템이 개발되고 운영될 수 있도록 시스템의 설계, 운영, 유지보수를 지원하고 관리하는 시스템엔지니어링의 한 분야



국내외 RAMS 관련 환경 변화

☐ 국제 철도 RAMS 규격 개정 추진

- IEC 62278 개정 추진
- EN50126, EN50128, EN50129 개정 추진

☐ 철도안전법 개정

(사후적 검증→사전 예방적 검증, 책임 권한 의무 명확화, 제작사, 운영사
입증 책임 : 인증기관 확인, 과징금 부과 등 제재 수단 도입)

- 철도안전관리체계 기술기준

☐ 타 산업에서의 RAMS 요구조건 강화

- 자동차: ISO26262
- 국방 RAM 규정
- 조선 등 기타 (IEC 61508: Functional Safety)

해외 철도 RAMS 관련 규격/기준

IEC 62278(2002), EN50126-1(1999)

Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)

IEC 62279(2015), EN50128 (2011)

Railway applications – Communications, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems

IEC62425(2007), EN50129 (2003)

Railway applications – Communications, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling

PD CLC/TR 50126-2 (2007)

Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)

Part 2: Guide to the application of EN50126-1 for safety

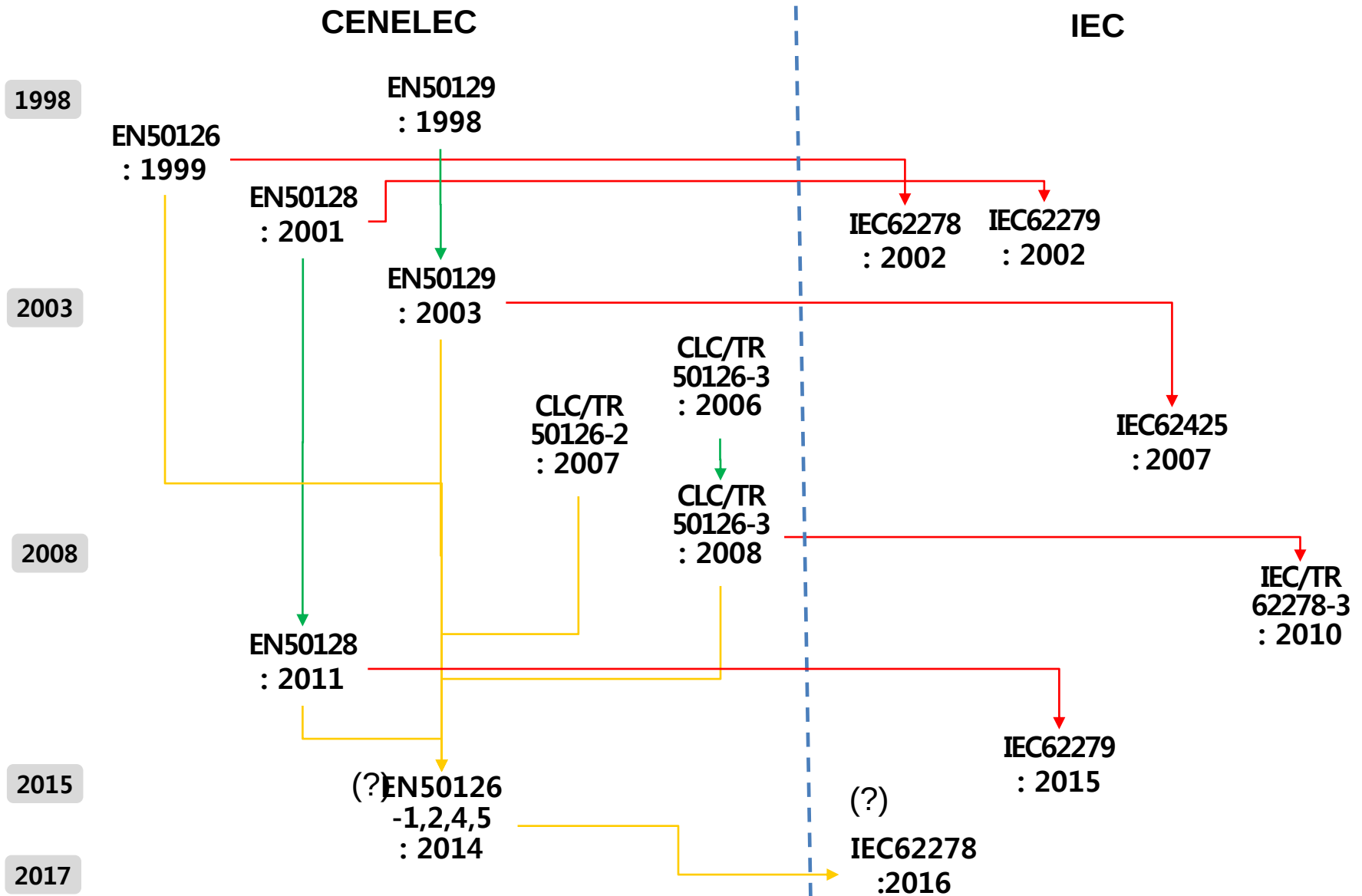
PD CLC/TR 50126-3 (2008), IEC/TR 62278-3 (2010)

Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)

Part 2: Guide to the application of EN50126-1 for rolling stock RAM

IRIS 및 TSI : RAMS 항목 요구

철도 RAMS 국제 규격 변화

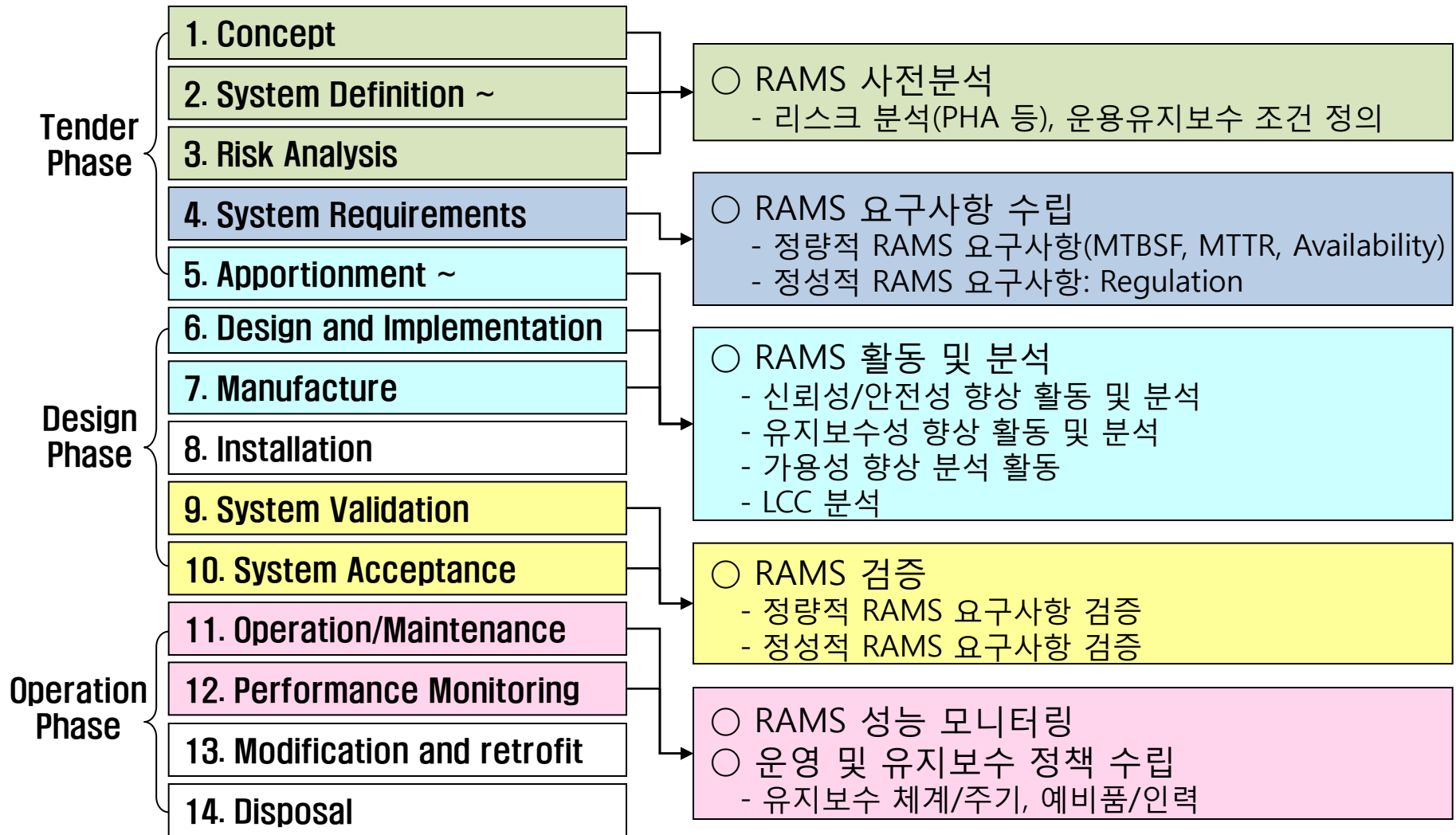


2. RAMS 목표 및 요구사항 관리

높은 철도 RAMS 성능을 위한 요건

1. 높은 RAMS 성능에 대한 사회적/국가적 요구 [국가/사회]
: 철도 RAMS 성능은 국민 삶의 질과 국가의 경쟁력에 영향
2. 높은 RAMS 성능을 가진 시스템의 획득 [운영기관/제작사]
 - 2.1 적합한 RAMS 요구조건의 제시 [운영기관]
 - 2.2 제시된 RAMS 요구조건에 맞는 제품의 개발/생산 [제작사]
 - 2.3 공급된 제품의 제시된 RAMS 요구조건과의 일치성 검증[운영기관/제작사]
3. 획득된 시스템의 RAMS 성능의 유지 [운영기관]
 - 3.1 운영단계에서의 RAMS 성능의 모니터링
 - 3.2 RAMS 기반의 운영 및 유지보수 기술 확보

RAMS 활동



Project Phase Related RAMS Tasks

Lifecycle Phase	RAM Tasks	Safety Tasks
1. Concept	• Review previously RAM performance • Consider RAM implications of projects	• Review previously achieved safety performance • Consider safety implications of project • Review safety policy and safety target
2. System Definition and Application Conditions	• Evaluate past experience data for RAM • Perform preliminary RAM analysis • Set RAM policy • Identify long term Op&Mtce conditions • Identify influence on RAM of existing infrastructure constraints	• Evaluate past experience data for safety • Perform preliminary hazards analysis • Establish safety plan (overall) • Define tolerability of risk criteria • Identify influence on safety of existing infrastructure constraints
3. Risk Analysis		• Perform system hazard & safety risk analysis • Set-up hazard log • Perform risk assessment

Project Phase Related RAMS Tasks (cont.)

Lifecycle Phase	RAM Tasks	Safety Tasks
4. System Requirements	• Specify system RAM requirements (overall) • Define RAM acceptance criteria (overall) • Define system functional structure • Establish RAM program • Establish RAM management	• Specify system safety requirements (overall) • Define safety acceptance criteria (overall) • Define safety related functional structure • Establish safety management
5. Apportionment of System Requirement	• Apportion system RAM requirements - Specify sub-system & component RAM requirements - Define sub-system & component RAM acceptance criteria	• Apportion system safety targets & requirements - Specify sub-system & component safety requirements - Define sub-system & component safety acceptance criteria • Update system safety plan

Project Phase Related RAMS Tasks (cont.)

Lifecycle Phase	RAM Tasks	Safety Tasks
6. Design and Implementation	• Implement RAM program by review, analysis, testing and data assessment covering - Reliability & Availability - Maintenance & Maintainability - Optimal maintenance policy - Logistic support • Undertake program control covering - RAM program management - Control of sub-contractors & supplier	Implement safety program by review, analysis, testing and data assessment addressing • Hazard log • Hazard analysis & risk assessment • Justify safety related design decision • Undertake program control covering - Safety management - Control of sub-contractor suppliers • Prepare generic safety case • Prepare (if appropriate) generic application safety case

Project Phase Related RAMS Tasks (cont.)

Lifecycle Phase	RAM Tasks	Safety Tasks
7. Perform environmental stress screening	• Perform environmental stress screening • Perform RAM improvement testing • Commence failure reporting and corrective action system (FRACAS)	• Implement safety plan by : review, analysis, testing & data assessment • Use Hazard log
8. Installation	• Start maintainer training	• Establish installation program • Implement installation program
9. System Validation	• Perform RAM demonstration	• Establish commissioning program • Implement commissioning program • Prepare application specific safety case
10. System Acceptance	• Assess RAM demonstration	• Assess application specific safety case

Project Phase Related RAMS Tasks (cont.)

Lifecycle Phase	RAM Tasks	Safety Tasks
11. Operation & Maintenance	- On-going procurement of spare parts & tools - Perform on going Reliability Centered Maintenance, Logistic Support	- Undertake on going Safety Centered Maintenance - Perform on going safety performance monitoring and hazard log maintenance
12. Performance Monitoring	Collect, analysis, evaluate and use performance & RAM statistics	Collect, analysis, evaluate and use performance & safety statistics
13. Modification & Retrofit	Consider RAM implications for modification & retrofit	Consider safety implications for modification & retrofit
14. Disposal	No activity for RAM	- Establish safety plan - Perform hazard analysis & risk assessment - Implement safety plan

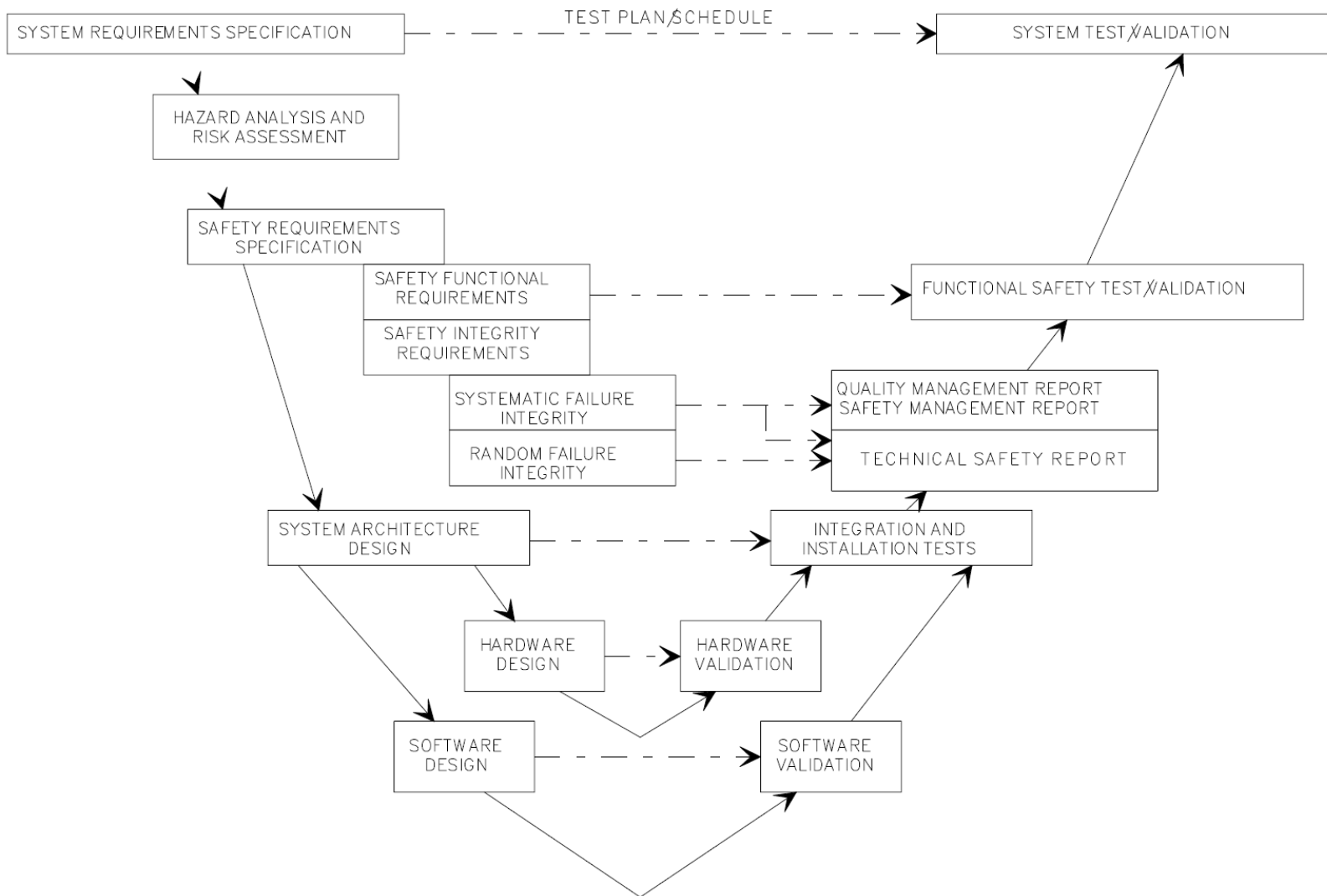
철도차량 RAM 요구사항 사례

	Reliability	Availability	Maintainability /Maintenance	Life Cycle Cost
Quantitative Requirements	- For system, subsystems, main functions - MKBSF 00 Km/car - MKBF 00 Km/car	- For system, subsystems, main functions - Inherent Avail.: 00% - Ach.d Avail.: 00% - Service Avail.: 00%	- For CM - MTTR: 00hr - MMH: 00hr - Mmax00%: 00hr - For PM - 00hr - the number of people	- Investment - Initial spare part - O&M equipment - Maintenance - Labor - Spare part consumption - Operation - Energy - Rail usage
Demonstration	Demonstration period: 6 ~ 18 months (after burn-in period)		Sampling test	From RAM results and others
Penalty/Bonus	- Guarantee period shall be extended - Withholding the payment - Monetary Penalization			

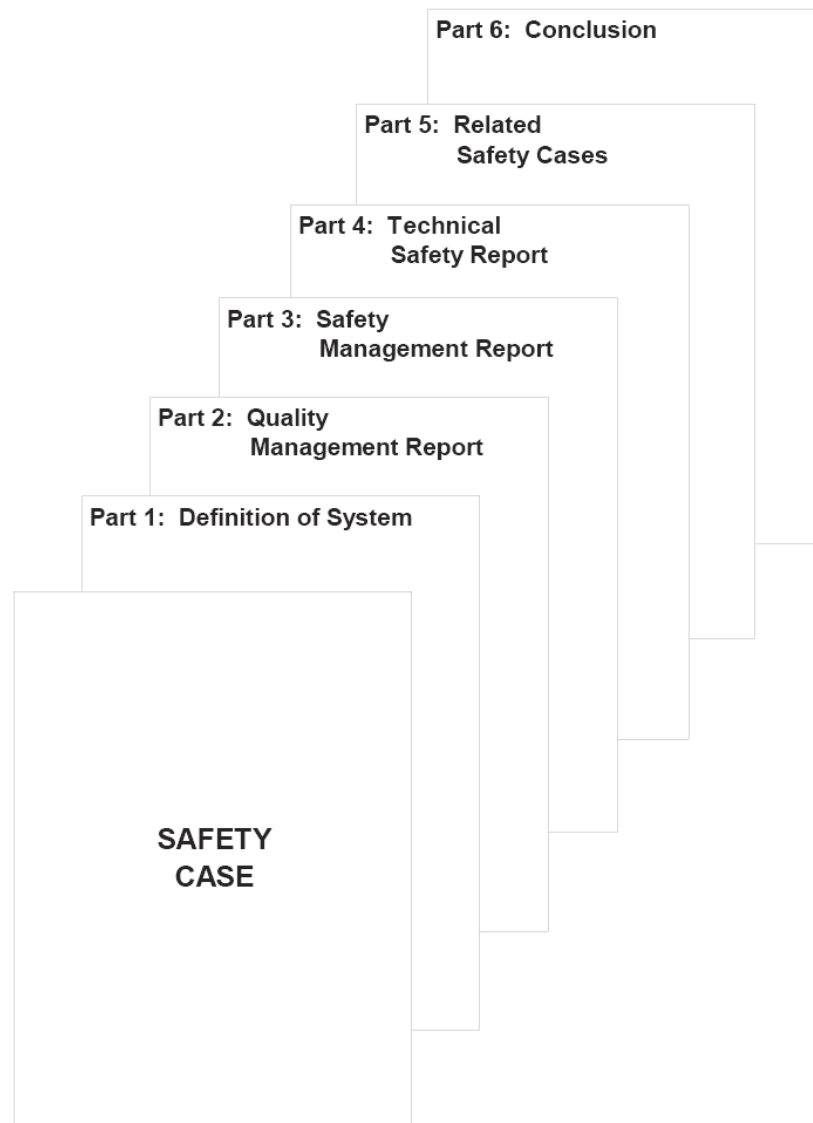
철도차량 신뢰성 요구조건 사례

신뢰성 요구조건의 정량적 척도로 아래의 척도가 일반적으로 사용됨

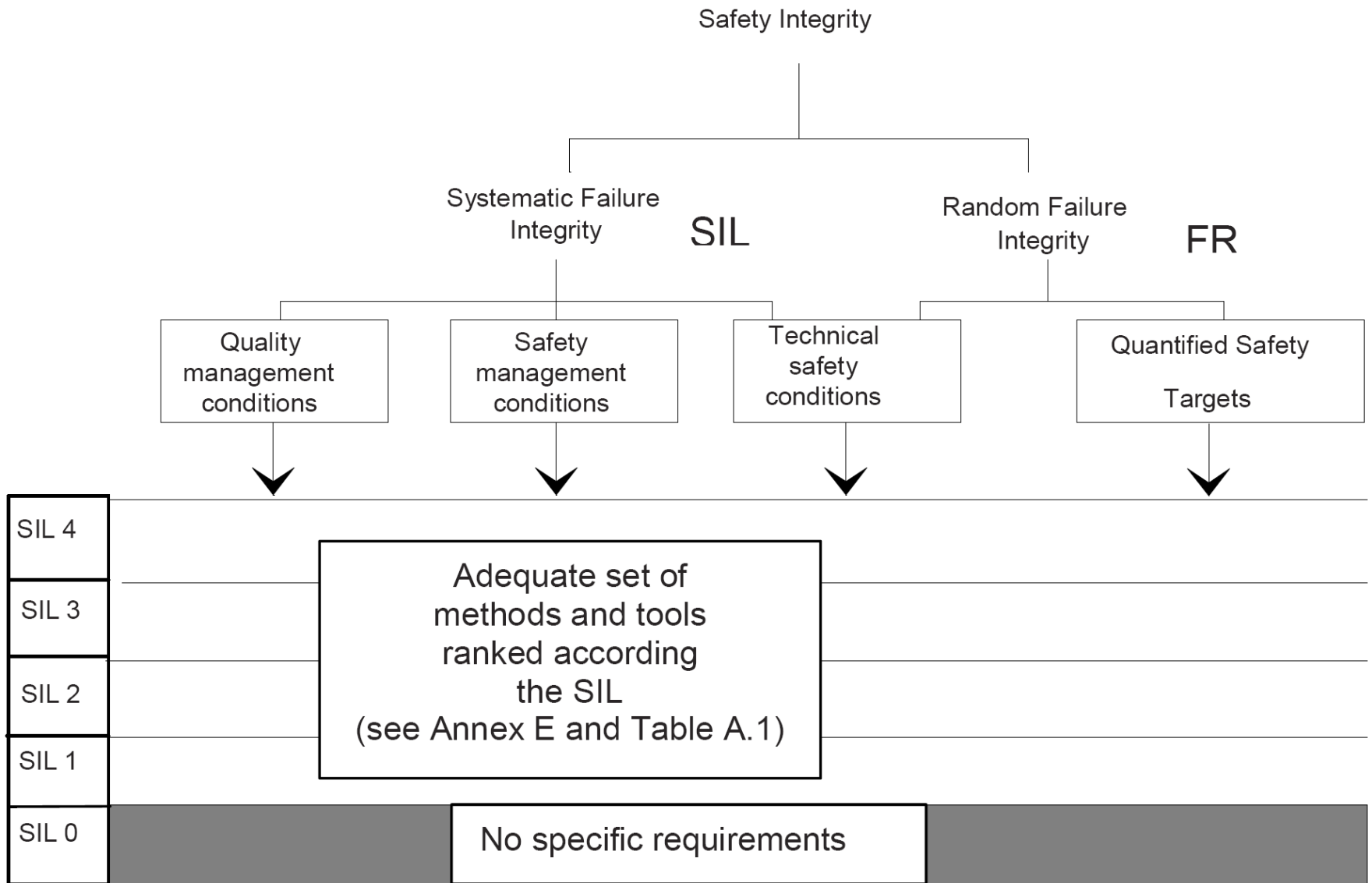
- MTB(L)F[Mean Time between (Logistic) Failures] : 로지스틱 고장들의 평균 시간 간격
- MDB(L)F[Mean Distance between (Logistic) Failures] : 로지스틱 고장들의 평균 거리 간격
- MTBSF[Mean Time between Service Failures] : 서비스 고장들의 평균 시간 간격
- MDBSF[Mean Distance between Service Failures] : 서비스 고장들의 평균 거리 간격
- 로지스틱 고장 : 서브 시스템 또는 구성품의 수리 또는 교환을 요구하는 고장
- 서비스 고장: 운행 중 또는 검사 과정에서 발생한 고장으로 아래 내용 중 하나의 결과를 초래한 고장
 - ()분 이상의 예정된 서비스의 지연을 초래하는 고장
 - 트랙에서 열차가 정지를 초래하는 고장
 - 열차의 운행 출고 불가를 초래하는 고장
 - 열차의 기지 회차를 초래하는 고장



Example of design and validation portion of system life-cycle (EN50129)



Structure of Safety Case (EN50129)



Relationship between SILs and technique (EN50129)

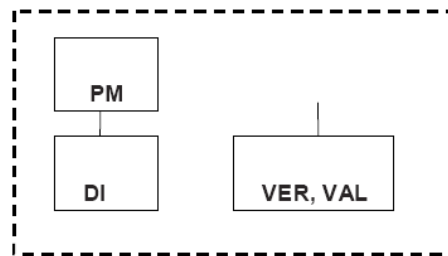
SIL Table

Tolerable Hazard Rate THR per hour and per function	Safety Integrity Level
$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$	1

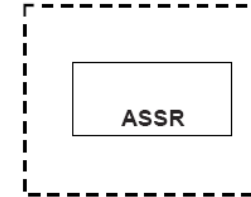
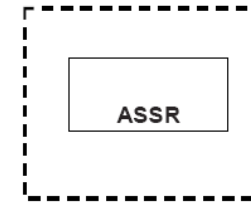
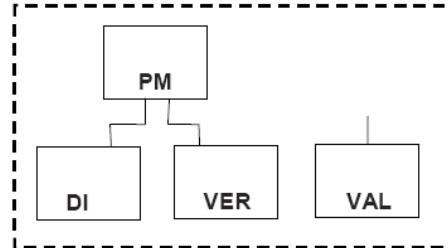
Techniques/Measures	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
1 Training of staff in safety organisation	HR: initial training in all relevant safety activities		HR: repetitive training or regular executing in all relevant safety activities	
2 Independence of roles	see Figure 6: Arrangement for independence			
3 Qualification of staff in safety organisation	HR: technical education or sufficient experience		HR: higher technical education or extensive experience	
4 (see note)				
NOTE Staff involved in safety activities shall be competent to perform those activities (see 5.3.3).				

Requirements for safety organization (EN50129)

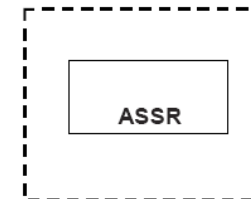
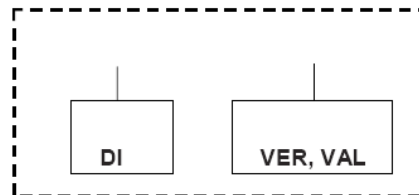
**SIL 3
AND 4**



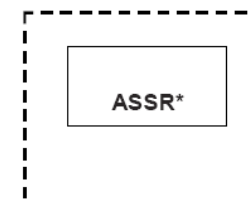
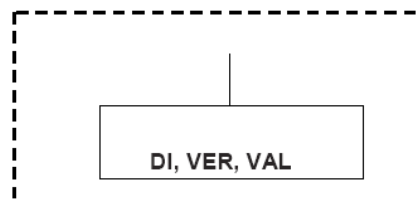
OR



**SIL 1
AND 2**



SIL 0



Arrangement of Safety Organization for Independence (EN50129)

Techniques/Measures	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
1 Separation of safety-related systems from non safety-related systems	R	R	HR	HR
2 single electronic structure with self tests and supervision	R	R	-	-
3 Dual electronic structure	R	R	-	-
4 Dual electronic structure based on composite fail-safety with fail-safe comparison	R	R	HR	HR
5 single electronic structure based on inherent fail-safety	R	R	HR	HR
6 single electronic structure based on reactive fail-safety	R	R	HR	HR
7 Diverse electronic structure with fail-safe comparison	R	R	HR	HR
8 Justification of the architecture by a quantitative reliability analysis of the hardware	HR	HR	HR	HR
NOTE All techniques of the grey shaded group are alternatives, i.e. R means that at least one of these techniques is recommended.				

Architecture of system/sub-system/equipment (EN50129)

RAMS 활동 및 분석

- **Periodical RAM Program reviews**
- **Preliminary Hazard Analysis**
- **System Condition and Mission Profile**
- **Reliability Modeling, prediction and apportionment**
- **FMECA analysis and Reliability Block Diagram**
- **Fault Tree Analysis**
- **Software Reliability analysis**
- **Corrective Maintenance Analysis**
- **Preventive Maintenance Analysis**
- **Fault isolation and trouble shooting actions Plan**
- **Reliability development/growth testing program**
- **Maintainability preliminary tests**
- **Reliability demonstration tests**
- **Maintainability demonstration tests**
- **Failure data collection from field**

철도차량 신뢰성 요구조건 사례

신뢰성 요구조건의 정량적 척도로 아래의 척도가 일반적으로 사용됨

- MTB(L)F[Mean Time between (Logistic) Failures] : 로지스틱 고장들의 평균 시간 간격
- MDB(L)F[Mean Distance between (Logistic) Failures] : 로지스틱 고장들의 평균 거리 간격
- MTBSF[Mean Time between Service Failures] : 서비스 고장들의 평균 시간 간격
- MDBSF[Mean Distance between Service Failures] : 서비스 고장들의 평균 거리 간격
- 로지스틱 고장 : 서브 시스템 또는 구성품의 수리 또는 교환을 요구하는 고장
- 서비스 고장: 운행 중 또는 검사 과정에서 발생한 고장으로 아래 내용 중 하나의 결과를 초래한 고장
 - ()분 이상의 예정된 서비스의 지연을 초래하는 고장
 - 트랙에서 열차가 정지를 초래하는 고장
 - 열차의 운행 출고 불가를 초래하는 고장
 - 열차의 기지 회차를 초래하는 고장

철도차량 정비성 요구조건 사례

보수정비(Corrective Maintenance)에 대한 정비성 요구조건으로 시스템의 평균수리시간(MTTR: Mean Time to Repair)을 부과한다. 주요 서브시스템 및 구성품의 평균수리시간(MTTR: Mean Time to Repair)을 부과할 수 있다. 보수정비(Corrective Maintenance)에 대한 정비성 요구조건으로 시스템, 주요 서브시스템 및 구성품의 수리시간의 00 백분위수를 부과할 수 있다.

정비성 요구조건 설정 예.

시스템 또는 서브시스템	MTTR(hour)	Mmax 00
Vehicle	<= 00	<= 00
Power electronics	<= 00	N/A
Side doors	<= 00	<= 00

정비성 요구조건으로 다음과 같은 조건이 설정될 수 있다.

- 고장 수리의 00% 이상은 00명 이하에 의해 수행될 수 있어야 하며, 00%는 00명 이하에 의해 수행될 수 있어야 한다.

예방정비의 종류(일상검수, 주간검수 등)와 각 예방정비별 최대허용시간을 설정한다.

철도차량 가용성 요구조건 사례

가용성의 척도로 아래와 같은 두 가지의 가용도가 일반적으로 사용된다.

- 고유가용도 (A_i)

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

고유가용도에는 예방 정비 및 행정 및 로지스틱 시간이 포함되지 않는다.
고유가용도는 순수 설계 측면만을 고려한 함수이다.

- 성취가용도

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + Mct + Mpt}$$

철도 RAM 요구사항 미충족에 대한 Penalty 사례

신뢰성 요구조건 미 충족 시

- 주당 총 비용의 0.05%의 Penalty 부과(총 Penalty 15% 이내)

정비성 요구조건 미 충족 시

- 30년간 정비성 요구조건 미 충족으로 발생하는 추가 인시 (man hour) 비용의 50%

가용도 요구조건 미 충족 시

- 5% payment 지급 보류
- 미 충족 기간 만큼의 Guarantee 기간의 연장

RAM 요구사항의 검증(입증)

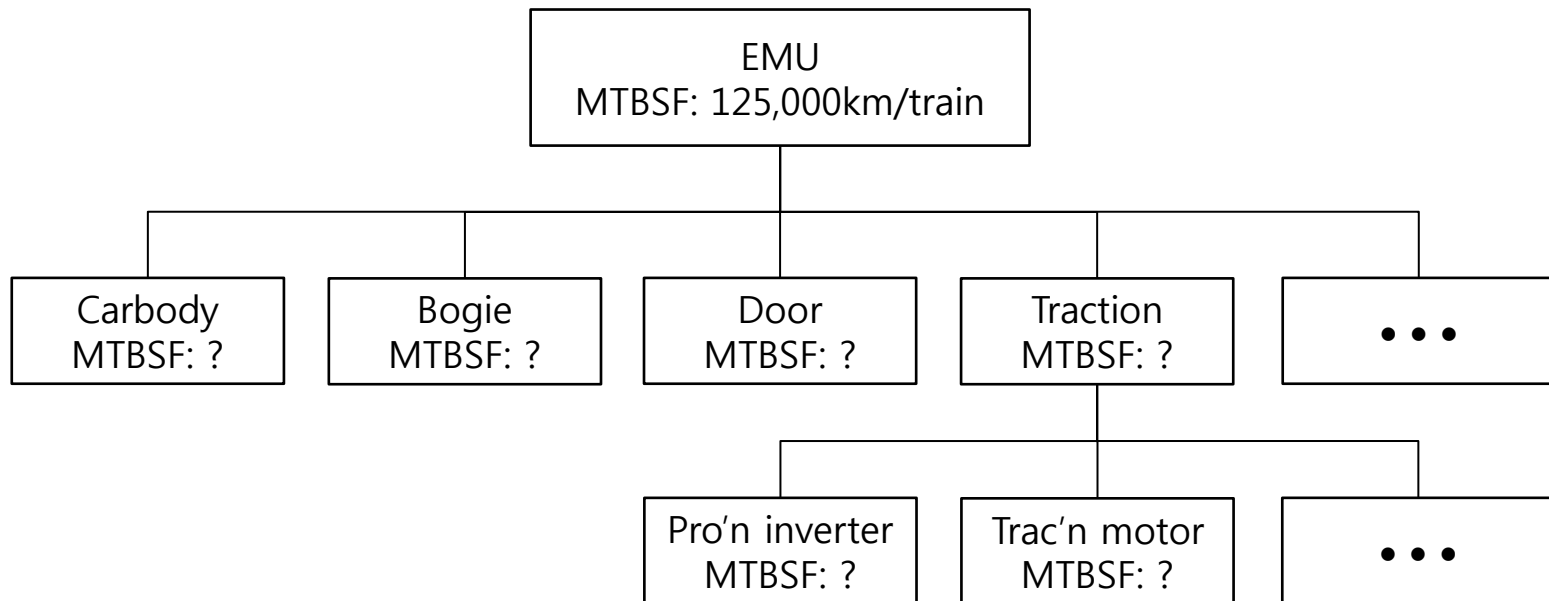
- 정량적 신뢰성 목표를 입증할 때에는 MIL-HDBK-781A의 검증 방법 중 하나를 준용하는 것이 바람직하다. 검증 시험의 기간은 실제 MTBF가 목표에 미달하는 데도 검증 시험을 통과할 오류가 발생할 확률이 충분히 작아질 수 있도록 결정되어야 한다.
- 정량적 정비성 검증은 실제 정비시간을 측정하여 검증하게 된다. 만약 전체 정비 대상 아이টে에 대한 검증시험을 수행할 수 없을 때는 적절한 수의 샘플을 선정하여 검증시험을 수행하게 된다. 이 때에는 정비도 목표에 미달하는데도 검증 시험을 통과할 오류가 발생할 확률이 충분히 작아질 수 있도록 결정되어야 한다.
- 고유가용도 및 성취가용도는 MTBF, MTTR, 평균예방정비시간의 예측값을 사용하여 검증한다. 이때 각 예측값의 오차를 평가하여 차량의 실제 가용도가 목표에 미달하는데도 검증 시험을 통과할 오류가 발생할 확률이 충분히 작아질 수 있도록 각 예측값의 오차를 줄여야 한다.

3. 신뢰성 목표 할당 및 예측

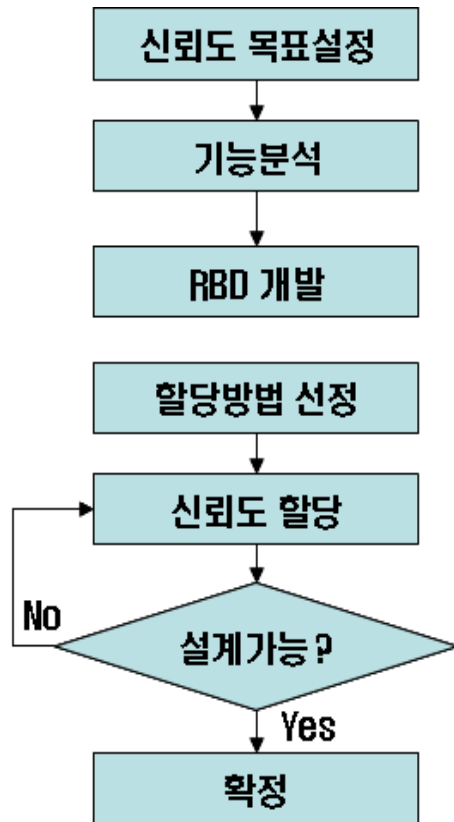
신뢰도 할당

- 신뢰도 할당(Reliability Allocation)

시스템에 설정된 신뢰도 목표값을 하부시스템 또는 더 낮은 수준의 부속품의 목표값으로 배분하는 과정



신뢰도 할당 절차 및 방법



	균등할당방법	ARINC 방법	Feasibility of Objective 방법	AGREE 방법
시스템 구조	직렬	직렬	직렬	직렬
신뢰성 척도	신뢰도	고장률	고장률	고장률
하부시스템 작동시간비율	×	×	○	○
하부시스템 고장률 자료	×	○	×	×
시스템 복잡성 (구성부품 수)	×	×	○	○
개발 완성도	×	×	○	×
작동환경의 가혹도	×	×	○	×
시스템 고장을 유발할 확률	×	×	×	○
○ : 반영 또는 필요, × : 비반영 또는 불필요				

Feasibility-of-Objectives 방법

- ① 기계-전기 시스템의 신뢰도 할당을 목적으로 개발되었으며, 하부시스템의 복잡성, 개발완성도, 가동시간 및 작동환경을 평가하여 신뢰도 할당가중치를 결정한다.

평가항목	평가기준 및 방법
복잡성(r_1)	구성 부품수와 조립의 복잡성이 클수록 높은 점수 부여
개발 완성도(r_2)	설계/기술 완성도가 낮을수록 높은 점수 부여
가동시간(r_3)	전체 임무기간의 가동시간이 길수록 높은 점수 부여
작동환경(r_4)	작동환경이 가혹할수록 높은 점수 부여

- ② 각 평가항목에 대하여 설계 엔지니어의 지식과 경험에 기초하여 1점~10점 사이의 점수를 매겨 평가한다. 한편, 점수 평가를 전문가 그룹을 대상으로 델파이법과 같은 투표방법을 사용하여 진행할 수도 있다.

Feasibility-of-Objectives 방법 (계속)

③ 신뢰도 할당과정은 다음과 같다.

(a) n 개의 하부시스템에 대하여 각 복잡성, 개발완성도, 가동시간 및 작동환경을 평가한다.

(b) k 번째 하부시스템의 가중치(Complexity Factor)를 다음과 같이 계산한다

$$c_k = \frac{w_k}{\sum_{k=1}^n w_k}, \quad w_k = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4$$

(c) k 번째 하부시스템에 대한 고장률을 다음과 같이 할당한다.

$$\lambda_k = c_k \cdot \lambda_s$$

여기서 λ_s : 전체 시스템의 목표 고장률

신뢰도 예측

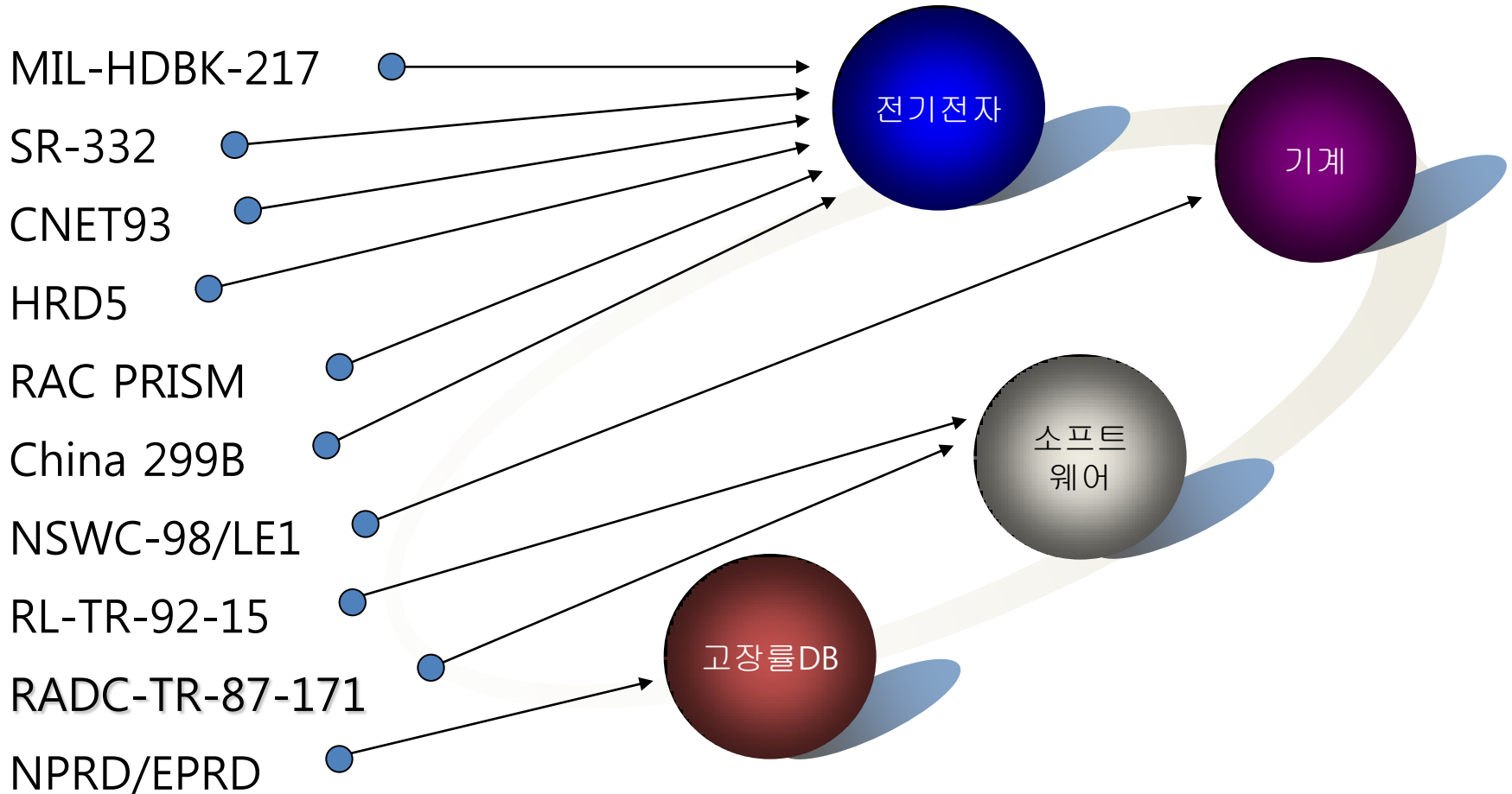
신뢰도 예측 절차



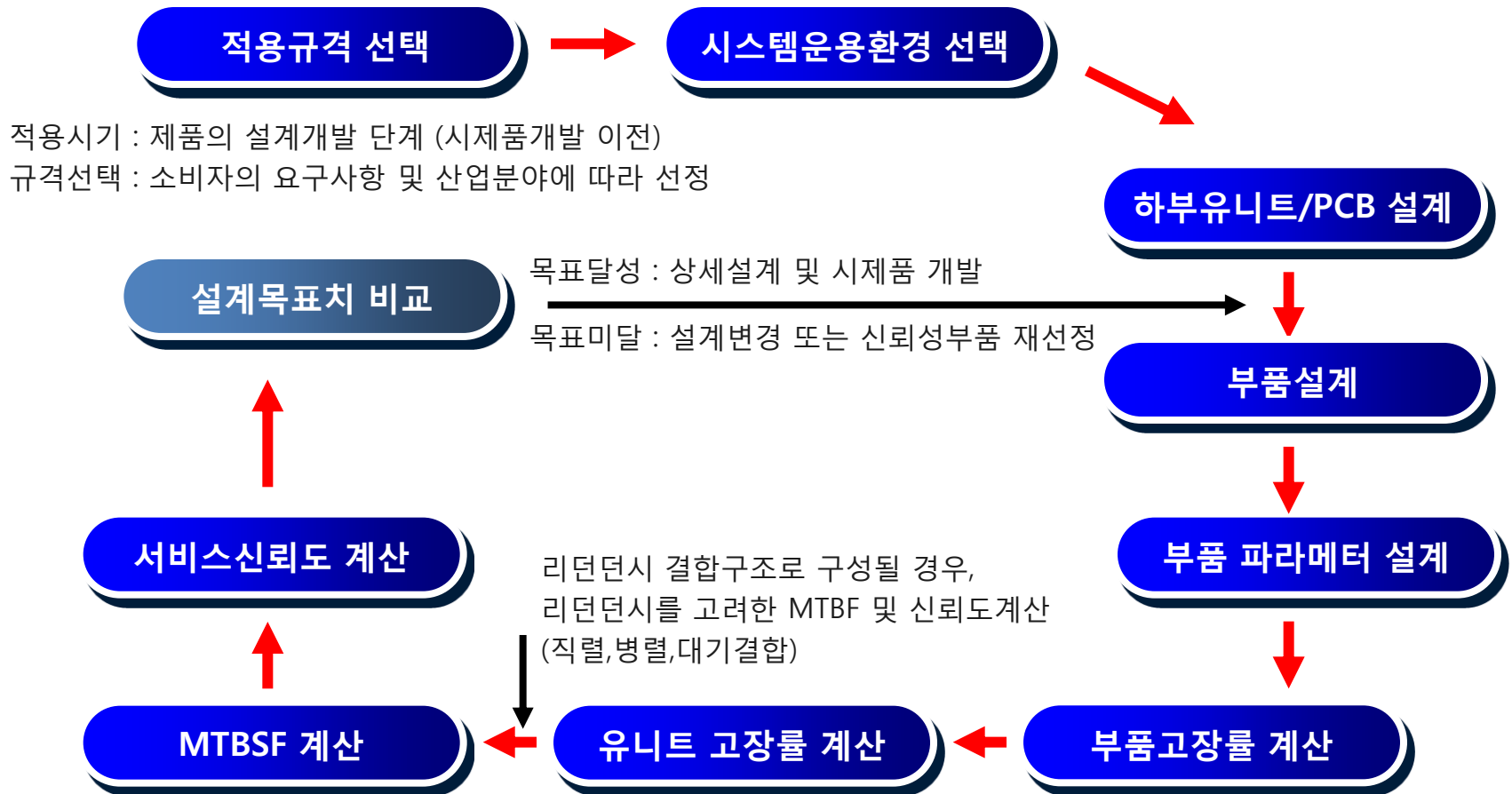
단위부품 신뢰도 예측 방법

수명평가방법의 종류		평가방법	장단점
필드데이터를 이용한 추정		필드에서 사용 중 고장 발생한 이력데이터를 이용하여 통계적으로 수명을 추정하는 방법	통계적으로 추정하는데 있어서 필요로 하는 정보(사용시간, 고장형태 등)가 포함된 필드 이력데이터가 확보되어야 함.
라이브러리를 통한 신뢰성예측		MIL-HDBK-217, Telcordia SR-332, PRISM 등 기존에 제시된 신뢰성예측방법을 적용하는 방법	현실과 예측값 사이에 차이가 크고, 예측방법에 있어서 팩터값을 어떻게 정하는가에 따라서 예측결과가 크게 달라짐. 우발고장기간의 평균수명 예측.
가속수명 시험에 의한 추정	부품가속수명시험	수명이 유한하여 제품의 수명을 결정지을 수 있는 대상 부품들의 수명을 평가하여 가장 짧은 수명을 갖는 부품의 수명을 제품의 수명으로 삼음	수명이 유한한 부품이 여러 종류인 경우 각 부품의 가속수명시험을 실시하여야 하므로 시험량이 많음
	제품가속수명시험	제품을 가혹한 조건에서 시험하여 빨리 고장을 낸 후 가속모델을 이용하여 정상사용조건에서의 고장시간으로 환산하여 수명을 추정하는 방법	제품을 구성하는 각 부품의 고장형태를 가속시키는 스트레스의 종류가 부품에 따라서 다름. 부품을 시험할 때 보다 제품을 시험하는 경우 스트레스를 높이는데 한계가 있음.

신뢰도 예측 라이브러리 DB

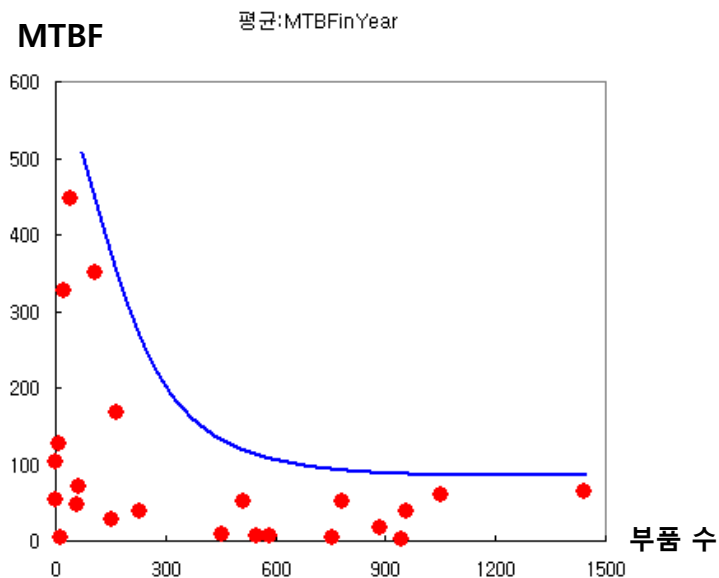


라이브러리에 의한 신뢰성 분석 절차

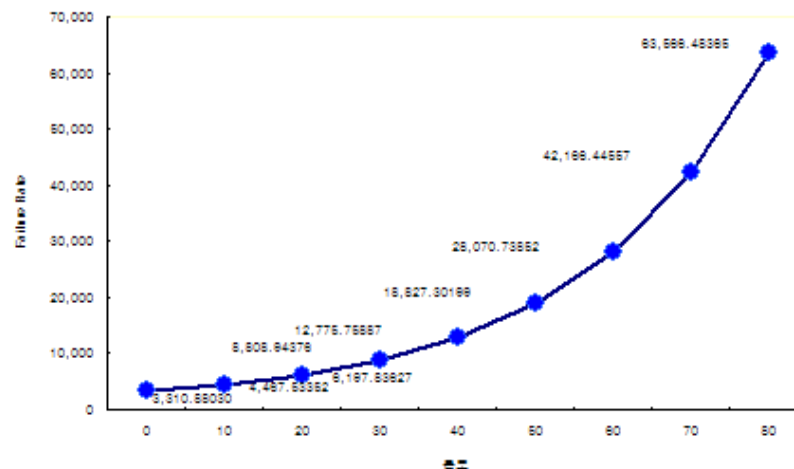


라이브러리 규격의 특징

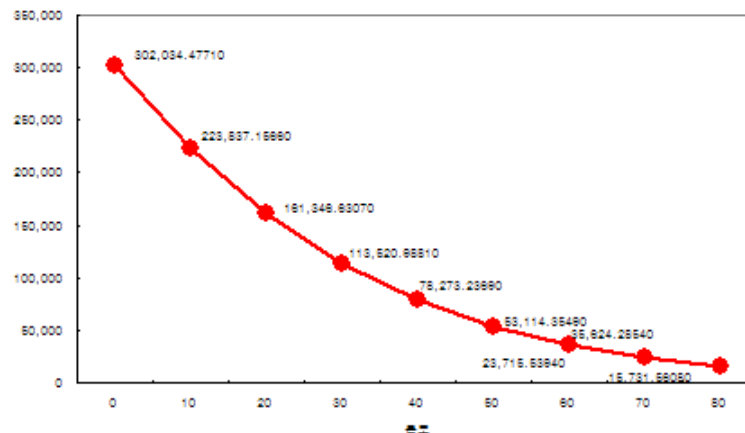
부품수와 MTBF 관계



온도와 Failure Rate 관계



온도와 MTBF 관계



서비스신뢰도(MTBSF) 예측

- 서비스 고장을 일으키는 시스템의 신뢰도 구조 모형을 정의해야 함
 - 신뢰도 블록도(RBD:Reliability Block Diagram)
 - 마코브 모형 (Markov Modeling)
 - etc
- 시스템의 운용 및 유지보수 조건 설정
 - MTBSF는 운영 조건 및 유지보수 조건에 영향을 받음
- MTBSF, 계산
 - 수치적 계산: 시스템의 신뢰도 구조 및 운영, 유지보수 조건이 단순할 경우
 - 시뮬레이션: 시스템의 신뢰도 구조가 복잡하거나 운영 및 유지보수 조건이 복잡할 경우 이용

신뢰성 블록도, FTA (예)

출처: 윤학선 외, 한국철도학회논문집 제14권 제6호 참조



4. 정량적 RAM 요구사항 설정

참조:

- 1) 정인수, 이강원, 김종운 (2008) “철도차량 정량적 신뢰성, 가용성, 유지보수성 (RAM) 목표값 설정에 관한 연구” 한국철도학회 논문집 제11권 제4호
- 2) 정인수, 김종운 이강원 (2008) “철도차량 정량적 신뢰성 요구사항 입증 시험에 관한 연구” 한국철도학회 논문집 제11권 제3호
- 3) 김종운, 박준서, 정인수 (2011) “철도시스템 정시성 요구조건을 만족하기 위한 서비스 신뢰도 목표값 설정” 한국철도학회 논문집 제14권 제1호

정량적 RAM 요구사항 설정

참조: 정인수, 김종운 이강원 (2008) “철도차량 정량적 신뢰성 요구사항
입증 시험에 관한 연구” 한국철도학회 논문집 제11권 제3호

□ 서비스 신뢰도

- 서비스 고장에 대한 명확한 사전 정의가 필수 : 열차지연 기준, 서비스 수준 등
- 대부분의 철도운영자는 정시성에 대한 기준 설정
- 철도서비스의 정시성을 만족시키기 위한 철도차량의 서비스 신뢰도 목표 설정
- 철도시스템의 서비스 신뢰도 요구사항의 전제
 - 고장분포는 지수함수 가정
 - 철도차량, 운영상의 문제, 궤도 전기 등 인프라의 고장은 상호 독립적이라고 전제

$$\lambda_{sys} = \lambda_i + \lambda_o + \lambda_r$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda_{sys}t} = e^{-(\lambda_i + \lambda_o + \lambda_r)t}$$

λ_{sys} : 철도시스템 고장율,

λ_i : 기반시설물로 인한 서비스 고장율

λ_o : 운영상의 이유로 인한 서비스 고장율, λ_r : 철도차량의 서비스 고장율

□ 서비스 신뢰도 (계속)

➤ 서비스 정시율

$$SA = SP \times R_s(t_m)$$

SP : 서비스 준비율, $R_s(t_m)$: 서비스 신뢰도, t_m : 1회 서비스 소요시간

➤ 새로운 철도차량이 기존 인프라와 운영조건하에서 운영된다면

➤ 새로운 철도차량의 목표 서비스 고장율 : 이 이하의 고장율

$$\lambda_r^* = -\frac{1}{t_m}(\ln SA - \ln SP) - (\lambda_i + \lambda_o)$$

➤ 고장율을 다루기 쉬운 고장간 평균시간 및 평균거리로 환산

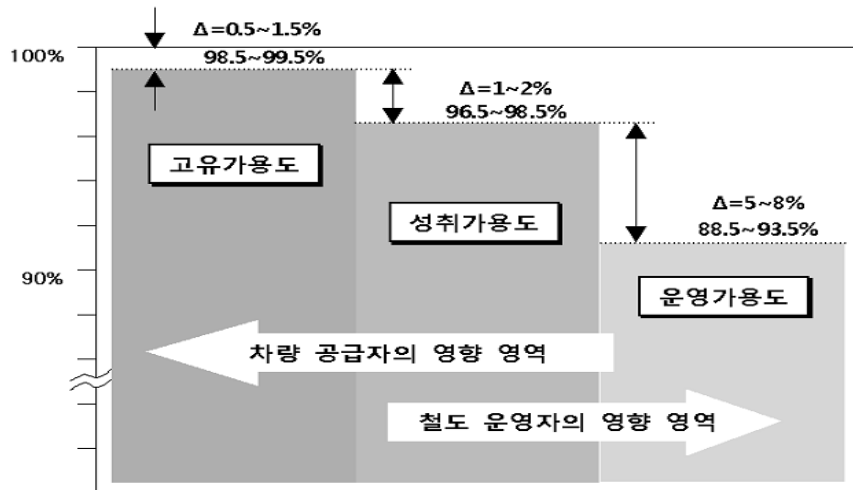
$$MTBSF_r^* = \frac{1}{\lambda_r^*} \quad [\text{hr}]$$

$$MKBSF_r^* = C \cdot MTBSF_r^* = C \cdot \frac{1}{\lambda_r^*} [\text{km}], \quad C : \text{철도차량의 운행 단위시간당 주행거리(km)}$$

□ 가용도

➤ 운영가용도의 정의로 부터,

$$A_o = \frac{TUT}{TT} = \frac{TUT}{TUT + TDT}$$

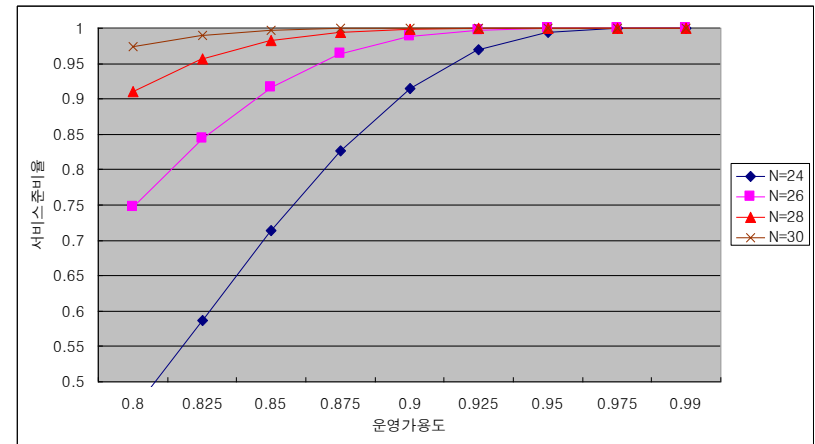


〈 현대적 철도차량에서의 가용도 종류와 일반적 값〉
(Eberlein et al)

➤ 서비스 준비율의 이항 분포식

$$SP = \sum_{x=S}^N \binom{N}{x} A_o^x (1 - A_o)^{N-x}$$

N : 소요편성수, S : 최소 소요편성수



〈 소요편성수에 따른 운영가용도와 차량서비스 준비율의 관계, S = 20 〉

□ 가용도 (계속)

➤ 서비스 준비율에 대한 이항분포식에서

- 최소 소요편성수가 주어지고, 차량 서비스 준비율을 설정하면
- 운영가용도와 소요편성수를 같이 결정

➤ 운영가용도로부터 고유가용도를 산출 : 비가동시간 산출

$$TDT = TT(1 - A_o)$$

$$TDT = TDT_{PM} + TDT_{CM} + TDT_{ALDT}$$

$$A_o = \frac{TUT}{TUT + TDT_{PM} + TDT_{CM}}$$

$$A_i = \frac{TUT}{TUT + TDT_{CM}} = \frac{MTBLF}{MTBLF + MTTR}$$

A_o : 성취가용도

A_i : 고유가용도

TUT : 총가동시간

TDT : 총비가동시간

TDT_{PM} : 예방정비 소요시간

TDT_{CM} : 교정정비시간

TDT_{ALDT} : 행정 및 로지스틱 지연시간

$MTBLF$: 로지스틱 고장 간 평균시간

$MTTR$: 평균수리시간

□ 수명주기비용 요구사항

➤ 로지스틱 신뢰도

- 로지스틱 고장 : 단순히 유지보수가 필요한 고장
- 안전성, 서비스 신뢰성과는 직접 관련이 없으나 수명주기비용에 영향
- 고유가용도와 평균고장수리시간(MTTR)이 주어지면 목표 로지스틱 신뢰도는 고유가용도의 정의로 부터,

$$MTBLF^* = \left(\frac{A_i}{1 - A_i} \right) MTTR$$

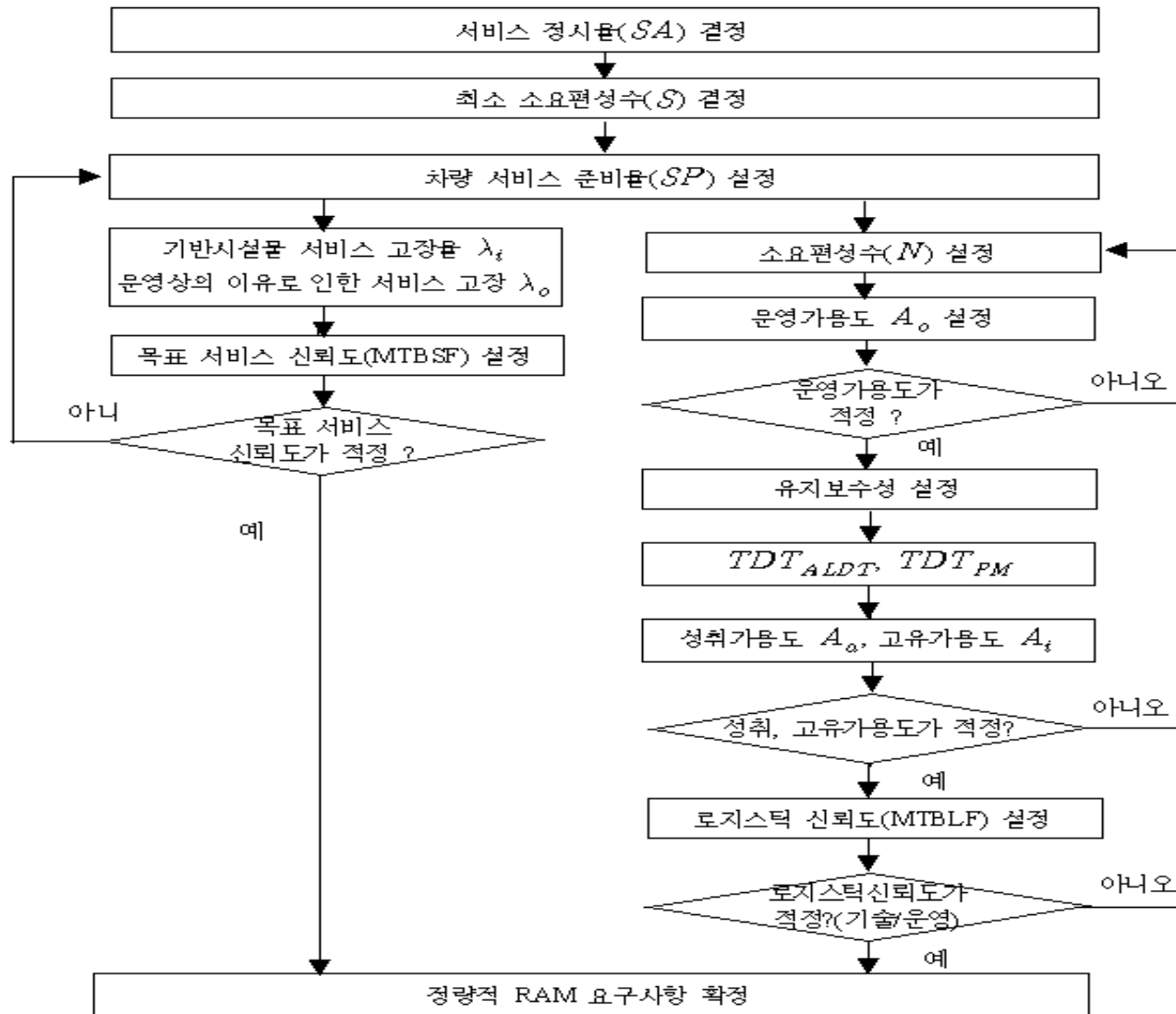
$$MKBLF^* = C \cdot MTBLF^* = C \cdot \left(\frac{A_i}{1 - A_i} \right) MTTR$$

C : 철도운영환경에 따라 정해지는 정수로서 철도차량의 운행 단위시간당 주행거리(km)

➤ 유지보수성

- 속도 : 평균고장수리시간(MTTR)과 예방정비별 소요시간 및 인시(man-hr)
- 현저한 기술적 진보가 없으면 유사 철도차량의 유지보수 현황을 기반으로 설정

□ 정량적 RAM 요구사항 설정 절차

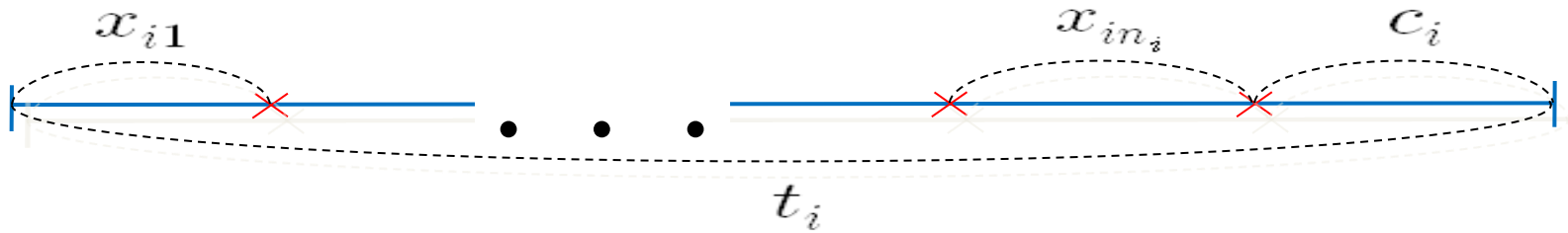


철도차량의 고정기간 신뢰성 입증 시험의 설계

목 적 : 철도 운영자 관점에서 신뢰성 입증 시험의 소비자 위험이 충분히 낮아질 수 있는 고정기간 신뢰성 시험의 통계량, 수락기준, 시험기간의 설계 방안을 제시한다.

- 신뢰성 입증 시험은 초기 입증시험의 종료시점에서 최우추정법에 의해 MTBF를 추정하고 추정된 MTBF가 수락기준값 이상이면 수락하고 미만이면 시험을 지속하는 것을 가정한다.
- MTBF 수락 기준값과 입증시험기간에 따른 소비자 위험을 계산하여 소비자위험이 충분히 작은 수락 기준값과 입증시험기간을 결정한다.

신뢰성 입증 시험에서의 데이터 구조



- m : 입증시험 편성의 수
- t_i : 입증시험기간 동안의 i 번째 편성의 운행시간(또는 거리)
- t^* : 입증시험기간 동안의 전체 편성의 총 운행시간(또는 거리)
- n_i : 입증시험기간 동안의 i 번째 편성의 고장개수
- n^* : 입증시험기간 동안의 전체 편성의 총 고장개수
- N^* : 입증시험기간 동안의 전체 편성의 총 고장개수를 나타내는 확률변수
- x_{ij} : 입증시험기간에서의 i 번째 편성의 j 번째 고장 간격
- c_i : 입증시험기간에서의 i 번째 편성의 마지막 고장시점 이후 시험 종료 시점까지의 운행시간
- λ : 철도차량의 실제 고장률
- θ_0 : 철도차량의 MTBF 목표
- θ_1 : 철도차량 입증시험에서의 MTBF 수락값
- $\hat{\theta}$: 입증시험을 통한 MTBF의 추정치

MTBF 최우추정치

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} + c_j \right)}{\sum_{i=1}^m n_i} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m n_i} = \frac{t^*}{n^*}$$

MTBF 수락기준

$$\frac{t^*}{n^*} \geq \theta_1$$

소비자 위험

$$\Pr \left[N^* \leq t^*/\theta_1 | \theta = \theta_0 \right] = \sum_{y=1}^{\lceil t^*/\theta_1 \rceil} \frac{e^{-t^*/\theta_0} (t^*/\theta_0)^y}{y!}$$

입증시험 운행시간에 따른 소비자 위험 ($\theta_0=100$, $\theta_1=110$)

입증시험기간	합격 고장 개수 상한	소비자위험
1000	9	0.4579
6000	54	0.2421
11000	100	0.1832
16000	145	0.1249
21000	190	0.0876
26000	236	0.0708
31000	281	0.0510
36000	327	0.0417
41000	372	0.0305
46000	418	0.0252
51000	463	0.0186
56000	509	0.0154
61000	554	0.0114
66000	600	0.0095

MTBF 수락값에 따른 소비자 위험 ($\theta_0=100, t^*=1000$)

MTBF 수락값	합격 고장 개수 상한	소비자위험
110	9	0.4579
120	8	0.3328
130	7	0.2202
140	7	0.2202
150	6	0.1301
160	6	0.1301
170	5	0.0671
200	5	0.0671
210	4	0.0293
250	4	0.0293
260	3	0.0103

철도시스템 신뢰성 목표 설정 예제

문제 정의

- 정시성 목표값(0.95)이 철도서비스 운영요구조건으로 주어짐
 - ‘정시에 도착한 열차 회수/일정표에 예정된 서비스 회수’ ≥ 0.95
 - 정시에 도착한다는 기준은 정해진 역에 예정된 도착시간보다 5분이상 초과하지 않고 도착한 경우임
- 위의 요구조건을 달성하지 못한 해당연도에는 철도운영자에게 패널티가 부과됨
- 총 운영기간동안 기대 패널티 부과회수가 적정수준 이하가 되도록 하는 철도시스템의 정시성/서비스신뢰도 목표(척도:MKBSF)를 설정하고 각 하위시스템에 대한 MKBSF요구조건을 하위시스템 공급자에게 부여함
- 서비스 고장의 정의
 - 정의된 시간 이상의 서비스 지연
 - 서비스로부터의 열차의 회수
 - 열차의 서비스 투입이 허용되지 않음

가 정

- (1) 정시성 요구조건은 ‘(정시에 도착한 열차 회수)/ (일정표에 예정된 열차 서비스 회수)’의 비율로 주어진다.
- (2) 정시 도착 기준은 모든 열차 서비스에 대해 일정하며 알려져 있다.
- (3) 정시성 요구조건을 충족하지 못한 해당연도에는 패널티가 부과된다.
- (4) 철도 서비스 운영연수는 알려져 있다.
- (5) 시스템의 고장 및 서비스 지연을 일으킬 수 있는 사건은 포아송 과정을 따른다.
- (6) 이차적 원인 즉 이미 발생한 지연의 결과에 의한 지연은 일차적 원인에 의한 지연의 일정비율만큼 지연되며 그 비율은 알려져 있다

서비스 신뢰도 목표 설정 절차

단계1) 하나의 서비스 운행기간 동안 일차적 원인에 의한 열차의 서비스 지연 사건이 발생하지 않을 확률 ($=P_s$) 목표값을 산정한다.

1.1) P_s 목표에 대한 후보값을 설정한다.

1.2) P_s 목표 후보값별로 벌금부과 확률 및 벌금부과 회수의 기대값을 식(1), (2)에 따라 계산한다.

1.3) 1.1)에서 설정한 후보값들에 대해 벌금 부과 확률이 적절한 정시도착 확률 후보값을 정시도착 확률 목표값으로 선정한다.

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

철도시스템의 운영연수($T_O=30$ 년) 동안 패널티 부과 회수(Y_{TO})는 모수가 T_O , P_m (연간 패널티부과확률)인 이항분포를 따르므로(가정5에 따라) 그 기대값은

$$\text{식 (1)} \quad E\{Y_{TO}\} = T_O \cdot P_m$$

$$\begin{aligned} \text{식 (2)} \quad P_m &= \Pr\{Y_1 > N_S \cdot (1 - PR)\} = \Pr\left\{Y_2 > \frac{N_S \cdot (1 - PR)}{1 + P_a}\right\} \\ &= \sum_{x=0}^{\left\lfloor \frac{N_S \cdot (1 - PR)}{1 + P_a} \right\rfloor} \binom{N_S}{x} (1 - P_s)^x P_s^{N_S - x} \end{aligned}$$

$Y_2 \sim B(N_S, 1 - P_s)$

- $N_S = 40000$: 연간서비스공급회수
- Y_1 : 일차, 이차적 원인에 의한 열차의 연간 정시 미 도착 회수
- Y_2 : 일차적 원인에 의한 열차의 연간 정시 미 도착 회수
- $P_a = 0.2$: 이차적 원인에 의한 서비스 지연 비율 [$Y_1 = Y_2(1 + P_a)$]

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

하나의 서비스 운행기간 동안 일차적 원인에 의한 열차의 서비스 지연 사건이 발생하지 않을 확률(P_s)에 따른 패널티 부과 확률 및 기대회수

$1-P_s$	P_s	연간패널티부과확률 (P_m)	총 패널티부과회수 $E(Y_{TO})$
0.05	0.95	1.0000	30.0000
0.049	0.951	1.0000	30.0000
0.048	0.952	1.0000	30.0000
0.047	0.953	1.0000	30.0000
0.046	0.954	1.0000	29.9996
0.045	0.955	0.9994	29.9830
0.044	0.956	0.9891	29.6743
0.043	0.957	0.9068	27.2050
0.042	0.958	0.6305	18.9145
0.041	0.959	0.2513	7.5395
0.04	0.960	0.0456	1.3666
0.039	0.961	0.0032	0.0964
0.038	0.962	0.0001	0.0024
0.037	0.963	0.0000	0.0000

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

단계2) 철도시스템 서비스신뢰도 목표값을 산정한다.

2.1) 선정된 정시도착 확률 목표값에 대한 모든 원인에 대한 평균 서비스 고장 간격을 식(3), (4)에 따라 계산한다.

2.2) 전체 정시 미도착 사건에 대해 기술적 (시스템) 원인에 의한 정시 미도착 비율을 과거 운행 경험에 의해 결정한다.

2.3) 기술적 (시스템) 원인 평균 서비스 고장 간격을 식(5)에 의해 계산한다.

$$\text{식 (3)} \quad P_s = \text{Exp}(-D_s / MKBSD)$$

$$\text{식 (4)} \quad MKBSD = -D_s / \ln(P_s)$$

$$\text{식 (5)} \quad MKBSF_{sys} = MKBSD / \beta$$

- $D_s=450\text{km}$: 1회 서비스의 운행거리
- $\beta = 0.2$: 일차적 원인에 의한 서비스지연 중 철도시스템 고장에 인한 지연 비율
- $MKBSD$: 일차적 원인에 의한 서비스 지연 사건들의 평균 간격
- $MKBSF_{sys}$: 철도시스템의 고장 및 결함에 의한 서비스 고장들의 평균 간격

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

단계 3) 철도시스템 서비스 신뢰도 목표값을 서브 시스템별로 할당한다.

3.1) 기술적(시스템) 원인에 의한 정시 미도착 사건에 대해 각 서브 시스템별 고장원인에 의한 정시 미도착 비율을 과거 운행 경험에 의해 결정한다.

3.2) 하위시스템별로 평균 서비스 고장 간격을 식(6)을 사용하여 할당한다.

$$\text{식 (6)} \quad MKBSF(i) = \frac{MKBSF_{sys}}{\theta(i)} \quad \sum_{i=1}^4 \theta(i) = 1$$

- $\theta(i)$: 철도시스템의 고장에 의한 서비스 지연 중 하위 시스템 i 의 원인에 의한 서비스 지연 비율 ($i = 1$: 차량, 2 : 신호/통신, 3 : 전력공급, 4 : 궤도)
- $\theta(1) = 0.5, \theta(2) = 0.3, \theta(3) = 0.1, \theta(4) = 0.1$
- $MKBSF(i)$: 하위 시스템(i) 의 평균 서비스 고장 간격 (단위 Km) ($i = 1$: 차량, 2 : 신호/통신, 3 : 전력공급, 4 : 궤도)

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

서비스신뢰도 목표값 설정 결과

P_s	$MKBSD$	$MKBSF_{sys}$	$MKBSF(1)$	$MKBSF(2)$	$MKBSF(3)$	$MKBSF(4)$
0.960	11,023.47	5,5118	110,235	183,725	551,174	551,174
0.961	11,311.97	56,560	113,120	188,533	565,599	565,599
0.962	11,615.65	58,079	116,157	193,595	580,783	580,783

- $MKBSF(i)$: 하위 시스템(i) 의 평균 서비스 고장 간격 (단위 Km)
($i = 1$: 차량, 2: 신호/통신, 3: 전력공급, 4: 궤도)

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

단계 4) 철도시스템 서비스 서브 시스템별 MKBSF 요구조건 값을 결정한다.

3.1) 신뢰성 입증 시험방법(기간 및 통과기준 등)을 결정한다.

3.2) MKBSF 요구조건 후보값별 소비자 리스크 및 생산자 리스크를 계산하여 이 두 값을 비교하여 적합한 MKBSF 값을 요구조건으로 선정한다.

- 소비자 리스크: 차량의 실제 MKBSF값이 MKBSF 목표값이하 임에도 불구하고 신뢰성 시험을 통과시킬 확률 (소비자 리스크를 가장 보수적으로 만드는 MKBSF 목표값을 확률 계산의 기준값으로 설정함)
- 생산자 리스크: 차량의 실제 MKBSF 값이 MKBSF 목표값보다 10% 높음에도 불구하고 신뢰성 시험을 통과하지 못할 확률

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

요구조건 기준: 2년의 고정기간 입증시험, 연간평균운행거리: 18,000,000km

차량시스템 MKBSF 요구조건 설정

MKBSF1	수락개수	소비자위험	생산자위험
113120	477	0.5054	0.0195
114251	472	0.4147	0.0336
115382	468	0.3447	0.0501
116513	463	0.2643	0.0793
117644	459	0.2074	0.1109
118775	454	0.1474	0.1621
119906	450	0.1086	0.2129
121037	446	0.0777	0.2721
122168	442	0.0539	0.3387
123299	437	0.0326	0.4297
124430	433	0.0211	0.5058

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

요구조건 기준: 2년의 고정기간 입증시험, 연간평균운행거리: 18,000,000km

신호/통신 시스템 MKBSF 요구조건 설정

MKBSF	수락개수	소비자위험	생산자위험
188533	286	0.5058	0.0545
190418	283	0.4352	0.0775
192303	280	0.3665	0.1073
194188	278	0.3226	0.1313
196073	275	0.2612	0.1741
197958	272	0.2063	0.2250
199843	270	0.1737	0.2633
201728	267	0.1312	0.3266
203613	265	0.1072	0.3721
205498	262	0.0772	0.4438
207383	260	0.0611	0.4930

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

요구조건 기준: 2년의 고정기간 입증시험, 연간평균운행거리: 18,000,000km

전력공급시스템 MKBSF 요구조건 설정

MKBSF1	수락개수	소비자위험	생산자위험
565599	95	0.5079	0.1744
571254	94	0.4670	0.2024
576909	93	0.4264	0.2332
582564	92	0.3864	0.2664
588219	91	0.3474	0.3021
593874	90	0.3098	0.3399
599529	90	0.3098	0.3399
605184	89	0.2740	0.3795
610839	88	0.2403	0.4206
616494	87	0.2088	0.4628
622149	86	0.1798	0.5055

서비스 신뢰도 목표 설정 절차(계속)

요구조건 기준: 2년의 고정기간 입증시험, 연간평균운행거리: 18,000,000km

궤도시스템 MKBSF 요구조건 설정

MKBSF1	수락개수	소비자위험	생산자위험
565599	95	0.5079	0.1744
571254	94	0.4670	0.2024
576909	93	0.4264	0.2332
582564	92	0.3864	0.2664
588219	91	0.3474	0.3021
593874	90	0.3098	0.3399
599529	90	0.3098	0.3399
605184	89	0.2740	0.3795
610839	88	0.2403	0.4206
616494	87	0.2088	0.4628
622149	86	0.1798	0.5055



감사합니다.