

# 철도차량 정량적 신뢰성 요구사항의 입증 시험에 관한 연구

## The Study on the Demonstration Test of Quantitative Reliability Requirements for Rolling Stocks

정인수<sup>†</sup> · 김종운\* · 이강원\*\*

In-Soo Chung · Jong-Woon Kim · Kang-Won Lee

**Abstract** It is very important to set a reliability target and verify the requirement when procuring the rolling stock in the aspect of safety, availability and LCC. While there are a few different methods to verify the reliability target, it is required that the most appropriate method should be used considering the characteristics of rolling stock itself and the operation environment. Even though recently the quantitative reliability requirements are widely adopted in domestic market, there is no substantial contents in the various standards and guidelines. In this study we investigate the various reliability demonstration test plans and evaluate them for rolling stock application. And three test plans among them were applied to the real operation data.

**Keywords** : Reliability demonstration, Test plan, RAMS, Rolling stock

**요 지** 철도차량을 구매하는 데 있어서 신뢰성 목표값을 설정하고 차량 납품 시 이 목표값을 달성하였는지 확인하는 것은 전체 차량의 안전성과 가용성 그리고 전수명주기 측면에서 매우 중요하다. 신뢰성을 검증하는 방법은 여러 가지가 있으나 철도차량 자체의 특성과 운영환경 등을 고려하여 가장 적합한 시험방법을 적용할 필요가 있다. 최근 들어 국내에서도 차량 구입 시 정량적 신뢰성 요구사항이 일반화되고 있으나 철도차량에 대한 각종 표준이나 지침에서는 정량적 신뢰성 입증에 대한 구체적 방법에 대한 내용은 없다. 본 연구에서는 다른 산업분야에서 활용되는 신뢰성 검증방법에 대해서 기술하고, 이 방법들을 철도차량에 적용할 수 있는 지 평가하였다. 그리고 이중 세 가지 방법을 철도차량의 실제 운영데이터에 적용해 보았다.

**주요어** : 신뢰성 입증, 시험계획, RAMS, 철도차량

### 1. 서론

정량적 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability and Safety) 지표는 철도차량의 품질을 나타내는 중요한 척도이다. 따라서 국내외의 철도차량 사양서에서는 정량적 RAMS 요구사항이 제시되고 있으며 이에 대한 달성과 입증을 요구하고 있다. 정량적 RAMS 요구사항 중 가장 기본이 되고 중요한 부분은 신뢰성에 대한 요구사항으로 철도차량의 정량적 신뢰성 척도로는 서비스고장간 평균주행거

리(Mean Kilometer Between Service Failure, MKBSF)가 가장 널리 사용되고 있다.

최근 들어 국내에서도 차량 구입 시 정량적 신뢰성 요구사항이 일반화되고 있다. 그러나 철도차량에 대한 각종 표준이나 지침에서는 정량적 신뢰성 입증에 대한 구체적 방법에 대한 내용은 없다.

따라서 철도운영자들은 차량 구매 시 정량적 신뢰성 요구사항을 구매사양에 포함시켜 놓고도 이를 입증하는 방안 에 대해서는 별로 관심이 없거나 다른 프로젝트의 사례를 모방하는 정도에서 업무를 수행하고 있다.

정량적 신뢰성 요구조건을 합리적으로 선정하는 일과 더불어, 계약에 따라 신뢰성 요구조건이 충족되었는지 입증하는 것은 필수적이다. 철도차량의 정량적인 신뢰성 입증 시험은 시험운영 또는 상업 운영 초기의 실제 고장 데이터

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 코레일  
E-mail : chungis@hanmail.net

TEL : (042)609-3703 FAX : (042)609-4915

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

\*\* 교신저자 : 정회원, 서울산업대학교 산업정보시스템공학과, 교수

를 통해 이루어진다. 이는 철도차량이 차량외의 다른 시스템과 많은 인터페이스가 필요하며, 실험실에서는 실제 운영 환경과 유사한 환경을 구축하는 것이 힘들다는 점에서 반드시 필요하다.

일반적인 신뢰성 시험에 대한 규격으로는 MIL-HDBK-781D[2], IEC 60300-3-5[4], IEC61123[5], IEC61124[6]가 있다. 그러나 이 규격에서 제시하는 신뢰성 시험 방법을 철도차량에 적용할 때에는 발주 후 설계 및 생산되어 납품되는 철도차량의 구매 절차의 특성을 고려하여 결정되어야 한다. 본 연구에서는 위의 규격에서 제시된 각 신뢰성 시험 방법에 대한 특성을 살펴보고 철도차량의 신뢰성 입증 시험으로 가능한지를 평가하고, 철도차량의 신뢰성 입증 시험을 수행할 때의 요구사항을 제시하고자 한다.

2장에서 여러 가지 신뢰성 시험 방법에 대한 설명과 특성을 기술하고, 3장에서는 각 시험 방법에 대한 철도차량에의 적용성을 평가한 후 4장에서는 철도차량에 적합한 시험 방법을 KTX의 운영 사례에 적용한다. 5장에서는 철도차량의 정량적 신뢰성 입증 시험에 대한 요구사항을 기술하고 6장에서는 결론 및 향후 연구방향을 제시한다.

## 2. 양산(量産)된 철도차량에 적용할 수 있는 신뢰성 입증 방법

이 장에서는 양산된 철도차량의 신뢰성을 검증하여 계약 이행여부를 결정하는 데 활용할 수 있는 신뢰성시험에 대해 설명하고 장단점을 비교하고자 한다. 양산된 철도차량의 신뢰성은 차량단위 또는 열차편성 단위는 물론이고 중요한 시스템들에 대한 신뢰성도 신뢰성 목표치를 계약에 명시하는 경우도 있다. 따라서 신뢰성 시험은 부품단위가 아니고 최소한 시스템 단위, 차량과 열차편성에 대해 이뤄져야 한다는 것을 감안해야 한다. 이러한 통계적 시험계획은 미리 설정된 합격-불합격 기준과 함께 계약적 이행여부를 결정하는 데 사용된다.

다음에는 미국 국방성의 MIL-HDBK-781D[2]와 IEC61124에서 제시하는 신뢰성 시험방법에 대해 기술한다.

### 2.1 MTBF 보증시험

MTBF 보증시험은 초기 결함고장이 제거되었다는 보증을 제공하는 것과 함께 일정 수준의 최소 MTBF가 달성되었음을 보증하는 데 활용된다. 이 시험은 초기 결함을 제거하는 ESS(Environment Stress Screen)과 함께 실시된다. ESS를 먼저 시작하고, ESS가 종료되면 MTBF 보증시험을 시작하는 데, 이 시험은 임무 수행 환경(Mission Profile Environment)하에서 시행된다.

이 시험은 질적시험(Qualification Test, QT)을 통과한 양산 장비에 사용될 수 있으며, 공급자에게 유리하게 통과될 확률이 높은 시험이다. 이 시험에서 시스템은 일정 기간(시험창, test window) 내에서 고장 없이(무고장 요구조건) 지정된 시험시간 동안 동작되어야 한다. 일반적으로 시험되는 장비가 실제로 최소 MTBF 수준을 만족한다면 매우 높은 통과율(예를 들어 98%)이 되도록 시험창이 선택된다.

시험통과율  $P(s)$ 는

$$P(s) = \frac{(M-1)^r(M+W-r)}{M^{r+1}} \quad (1)$$

여기서,  $M$  = 최소 MTBF 수준, 시간(hour)

$W$  = 시험창,  $r \leq W \leq 2r$ , 시간(hour)

$r$  = 무고장 기간, 시간(hour)

이다. 만일  $W$ 와  $r$ 의 비가 2보다 작으면, 결과의 통계적 신뢰도 수준이 저하된다. 또한 이 비율이 2보다 크면 결과의 통계적 신뢰도 수준이 크게 증가하지도 않으면서 시험시간이 길어지게 된다. 따라서 최적의  $W$ 와  $r$ 의 비율은 2이다.

식 (1)과  $W = 2r$ 을 이용하면 어떤 원하는  $P(s)$ 에 대해서 무고장기간 즉 시험창을 구할 수 있다. 예를 들어, 만일  $P(s) = 0.98$ 이라고 하면 식 (1)은

$$0.98 = \frac{(M-1)^r(M+r)}{M^{r+1}} \quad (2)$$

이 식을  $M$ 의 항으로  $r$ 에 대해서 풀면 다음과 같은 실험적 관계식을 얻을 수 있다.

$$r = 0.212M \quad (3)$$

수치 예를 들어 보면, 임의의  $M = 150$ 시간과  $r = 10$ 시간인 경우에 최적의 시험창  $W = 2r = 20$ 시간을 선택하면, 식 (1)로부터 통과확률  $P(s) = 0.9976$ 이 된다.

### 2.2 확률비율 연속시험(Probability Ratio Sequential Test, PRST)

MIL\_HDBK\_781D와 IEC61124에서의 시험계획은 특정한 신뢰성 요구조건에 적합한지를 결정하는 통계적 기준을 제공한다. 또한 고장간 시간 분포는 일정한 고장률을 의미하는 지수함수라고 가정하고 있기 때문에 설계결함이나 초기고장을 제거하는 목적으로 사용될 수 없다.

PRST는 사전에 결정된 공급자와 소비자 위험( $\alpha$ ,  $\beta$ )과 함께 사전에 결정된 MTBF 값을 합격이나 불합격이나를 결정하고 싶을 때와 총 시험시간의 불확실성이 별로 중요하지 않을 때에 선택할 수 있다. 여기에서 공급자위험  $\alpha$ 는

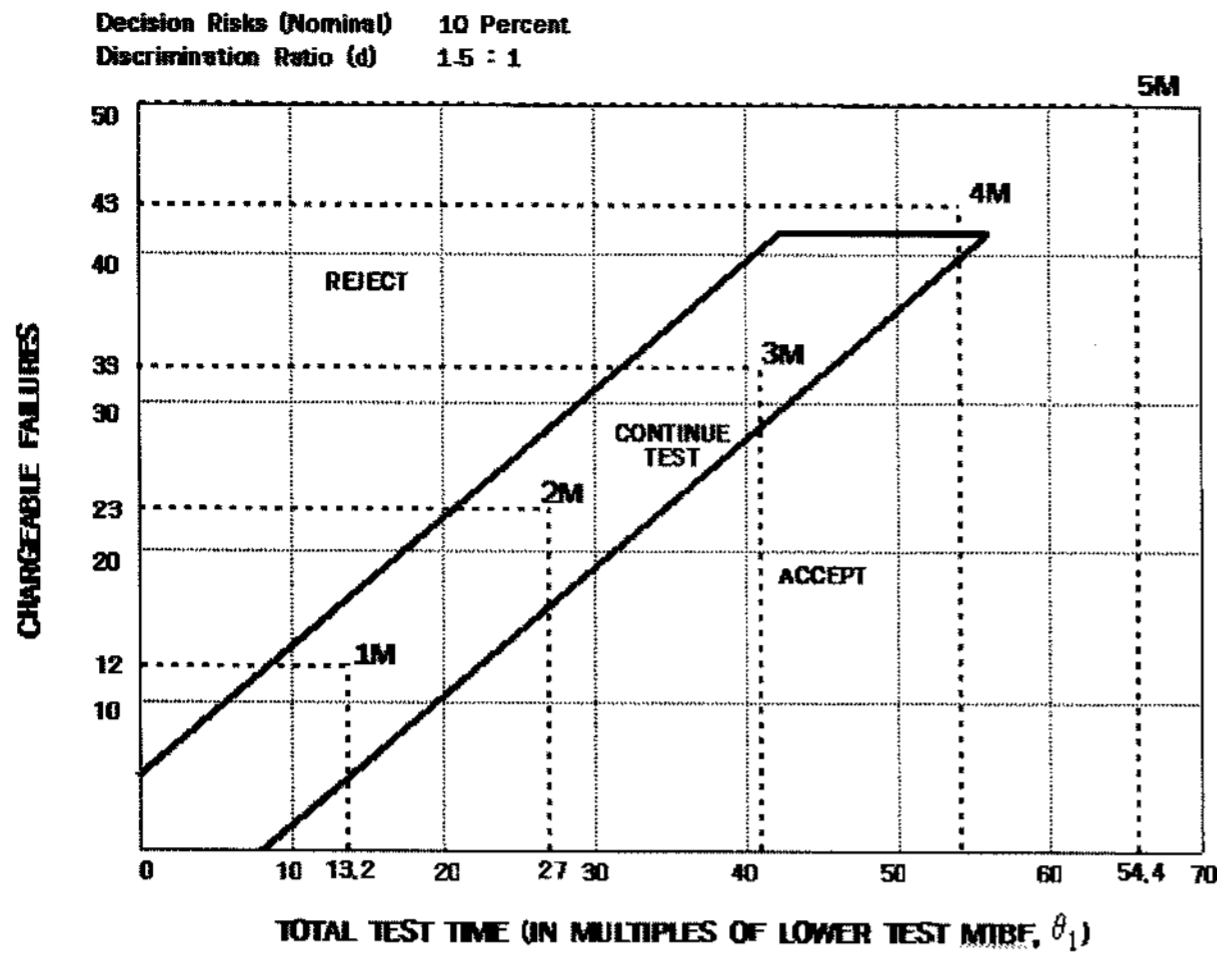


Fig. 1. Test Plan I-D in MIL\_HDBK\_781D

시험대상이 규정된 신뢰성 기준에 적합한 값을 가지고 있음에도 불구하고 불합격될 확률(제1종 위험)이고, 소비자 위험  $\beta$ 는 시험대상이 규정된 신뢰도 기준에 적합하지 않음에도 불구하고 합격될 확률(제2종 위험)을 의미한다. 이 시험은 참 MTBF 값이 하한 MTBF값( $\theta_1$ )보다 많이 크거나 상한 MTBF값( $\theta_0$ )보다 많이 작을 때, 비슷한 위험과 차별비율(Discrimination ratio)을 가진 고정기간 시험계획보다 시험시간을 줄일 수 있다.

PRST는 전자장비시험에 광범위하게 사용되고 있다. MIL-HDBK-781D에는 여섯 개의 기본 표준시험계획(I-D~VI-D)이 제공된다. 시험기간이 너무 길고 비용이 많이 든다고 생각될 경우에는 단기간 고위험(Short-run, High-risk) 시험계획을 채택할 수 있으며, MIL\_HDBK\_718D에는 두 개의 표준시험계획(VII-D, VIII-D)이 제공된다. 또한 IEC61124에는 A1~A9와 C1~C8의 17개의 시험계획이 제공된다.

PRST에 대한 합격-불합격 기준이 그래프와 표의 형태로 제공되고 또한 참 MTBF 값의 추정치에 기초한 이에 대응

하는 운영특성곡선(OC curve)과 기대시험 시간곡선이 제공된다. 합격-불합격에 의해서 시험이 종료되는 MTBF의 상한, 하한 신뢰도 기준을 계산하는 절차에 대해서는 Schmee와 Bryant에 의해 잘 정립되어 있다[7]. Fig. 1은 MIL-HDBK-781D의 시험계획 I-D의 그래프형태의 기준을 보여준다.

이 시험에서의 입증기준은 다음과 같다.

- 합격 :  $r \leq r_0$ 에 대해  $T^* \geq Ta^*$ 인 경우
- 시험계속 :  $r \leq r_0$ 에 대해  $Tr^* < T^* < Ta^*$ 인 경우
- 불합격 :  $r \leq r_0$ 에 대해  $T^* \geq Tr^*$   
또는  $r \geq r_0 + 1$

여기에서,  $T^*$ : 누적시험시간,  $Ta^*$ : 합격기준 누적시험시간,  $r$ : 시험중 발생한 고장건수,  $r_0$ : SPRT의 표준고장건수,  $Tr^*$ : 불합격기준 누적시험시간이다.

### 2.3 고정기간시험(Fixed Duration Test)

고정기간시험은 합격-불합격의 결정 뿐 아니라 시험에 의해서 검증되는 참값의 MTBF에 대한 추정치를 얻기 위해서는 꼭 필요한 시험이다. 또한 총시험시간을 꼭 알아야 할 필요가 있을 때는 이 방법을 활용한다. 이 시험은 시험계획에 있어서 현저한 장점이 있다. 즉, 시험기간이 고정되어서 시험을 계획하는 사람은 공급자와 소비자 위험, MTBF 상한값과 하한값 그리고 시험기간 사이에서 절충(trade-off)을 할 수 있다[1].

MIL-HDBK-781D에는 12개의 가장 빈번하게 사용되는 표준시험계획이 IX-D~XVII-D에 있으며 Table 1에 이 표준시험계획의 개요가 있다. 또한 XIX-D~XXI-D는 30% 정도의 고위험도에 대한 시험계획을 대표한다. IEC61124에서는 B1~B13의 13개의 시험계획을 제공한다.

이 시험에서의 입증기준은 다음과 같다.

Table 1. Standard Fixed Duration Test Plan in MIL-HDBK-781D

Test Plan	True decision risks (%)		Discrimination ratio (d), $\theta_0/\theta_1$	Test duration, $T_t^*(\theta_1)$	Number of failures, c	
	$\alpha$	$\beta$			Reject ( $\geq$ )	Accept ( $\leq$ )
IX-D	12.0	9.9	1.5	45.0	37	36
X-D	10.9	21.4	1.5	29.9	26	25
XI-D	19.7	19.6	1.5	21.5	18	17
XII-D	9.6	10.6	2.0	18.8	14	13
XIII-D	9.8	20.9	2.0	12.4	10	9
XIV-D	19.9	21.0	2.0	7.8	6	5
XV-D	9.4	9.9	3.0	9.3	6	5
XVI-D	10.9	21.3	3.0	5.4	4	3
XVII-D	17.5	19.7	3.0	4.3	3	2

- 합격 :  $T_t^*$ 에서  $r \leq c$
- 불합격 :  $T_t^*$ 에서 또는  $T_t^*$  이전에  $r > c$

여기에서,  $T_t^*$ : 시험기간,  $c$ : 합격기준 고장건수이다.

### 2.4 전(全) 장비 인수시험계획(All-equipment Production Reliability Acceptance Test Plan)

전 장비 인수시험 계획은 양산되는 모든 제품에 대해 신뢰성 로트 인수시험이 필요할 때 선택할 수 있다. 즉, 생산 방식이 장비의 신뢰성을 저하시키지 않았음을 보증하기 위해서 시행한다. 다만 실제 활용될 때는 QT시 사용되었던 실제 연속시험계획에 기초한 시험이 선정되어야 한다. 시험의 시험기간은 시험절차에 규정되어야 하고 구매 시 승인되어야 한다. 구매 시 규정되지 않는다면, 최대시험시간은 50시간, 최소시간은 20시간이 되어야 한다. 만일 규정된 시험기간이 끝날 때까지 불합격(REJECT)선에 도달하지 않는다면 합격이고, 불합격선에 도달하면 불합격이며 교정활동을 시행한 이후 재시험을 시행한다.

표준 시험계획은 MIL-HDBK-781D의 시험계획 XVIII-D에 나와 있다. Fig. 2는 시험계획 XVIII-D의 불합격선과 경계선을 보여준다. 이 선들은 시험기간 동안 계속 연장할 수 있다. 표준 시험계획 외에도 모든 PRST 계획으로부터 유일한 전 장비 시험계획을 개발할 수 있다. 이 시험에서의 입증기준은 PRST에서와 같다.

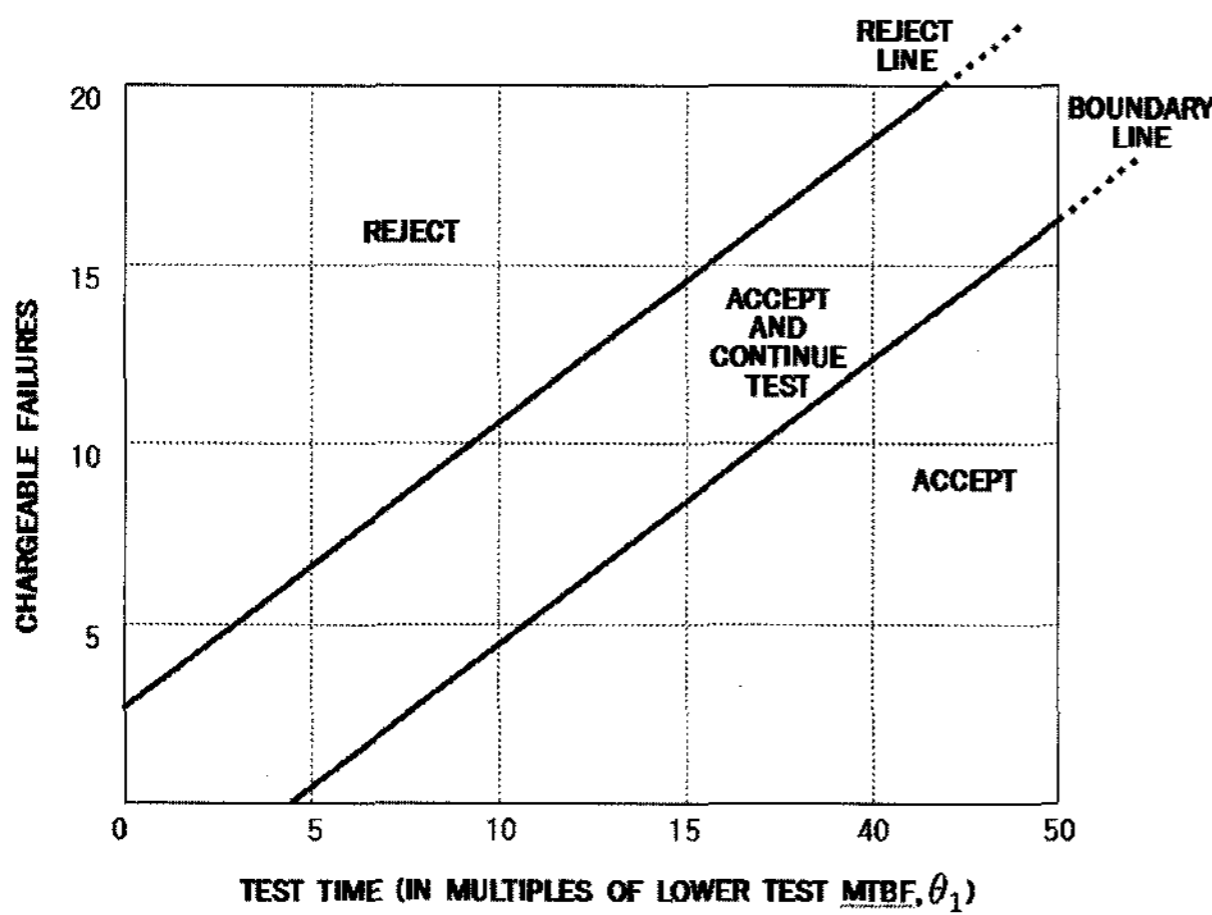


Fig. 2. Test Plan XVIII-D in MIL\_HDBK\_781D

### 2.5 합성시험(Combined Test)

합성시험은 불합격선은 일정한 고장건수를 이용하고, 반면에 합격선은 곡선을 이용한다. 따라서 고신뢰성을 갖는 시험대상은 조기에 합격할 수 있는 반면, 많은 초기 고장을 갖는 대상은 즉각적으로 불합격되지는 않는다. IEC61124

에는 D1~D8의 8개의 시험계획을 제공한다. Fig. 3은 연속 시험계획 C1과 합성시험계획 D1의 차이점과 합격기준선을 보여준다. 이 시험에서의 시험기간은 앞의 연속시험과 고정기간시험에서와는 다르게 목표신뢰성( $m_0$ )의 배수로 되어 있다.

이 시험의 입증기준은 다음과 같다.

- 합격 :  $r \leq r_0$ 에 대해  $T^* \geq T_a^*$
- 시험계속 :  $r \leq r_0$ 에 대해  $Tr^* < T^* < T_a^*$ 인 경우
- 불합격 :  $r > r_0 + 1$

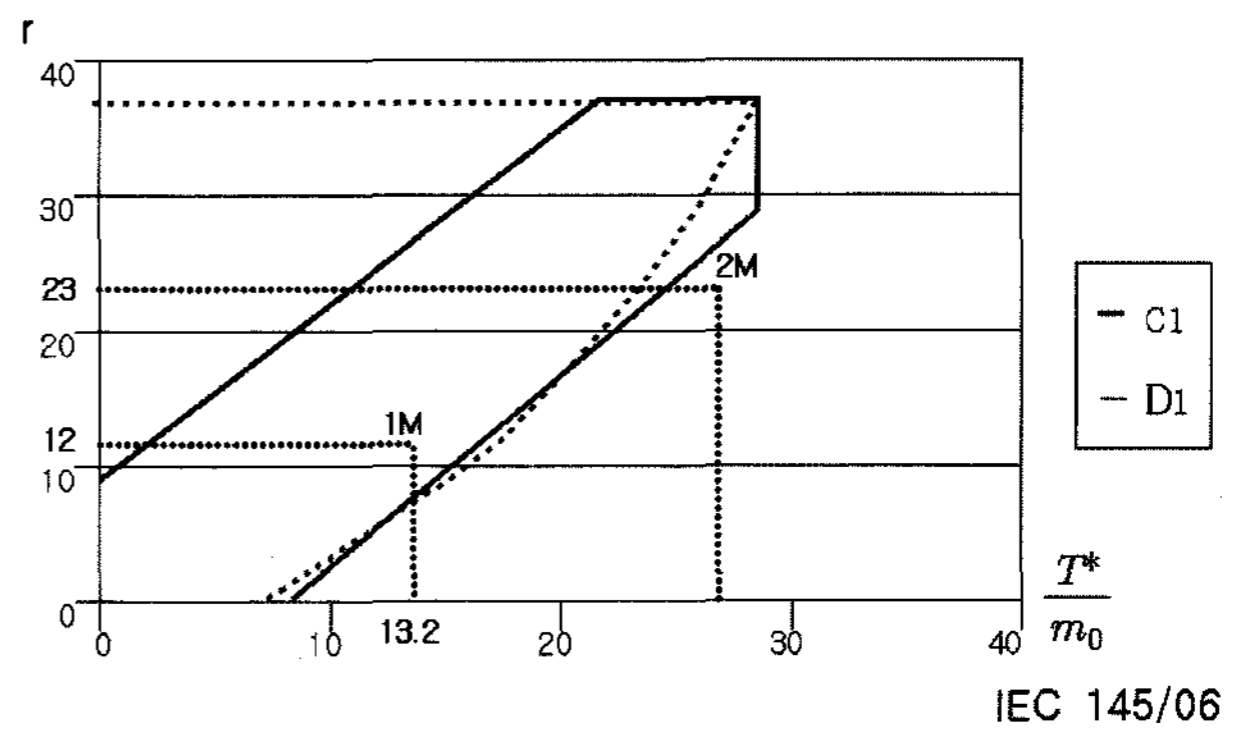


Fig. 3. Combined Test Plan D-1 in IEC61124

### 3. 신뢰성 시험방법의 평가

MTBF 보증시험은 MTBF를 증명하기 위해 '무고장기간'이라는 개념을 이용한다. 초기결함이 제거되었고 최소한의 규정된 MTBF 수준이 달성되었음을 확인하는 데 사용된다. 철도차량의 경우 영업운행에 투입되는 모든 편성에 적용한다는 것을 고려하면 무고장기간과 시험창이 너무 좁음을 알 수 있다. 결과적으로 MTBF 보증시험은 철도차량 양산차의 신뢰성검증 수단으로 활용하는 데는 현실적인 어려움이 있다고 판단된다.

PRST는 공급자위험  $\alpha$ 와 소비자위험  $\beta$ 를 정하고, 합격불합격의 기준인 MTBF 상한·하한값을 사전에 지정하여 신뢰성을 결정하는 방법이다. 총 시험시간이 불확실하여 철도차량과 같이 생산자의 보증활동이 많은 경우에는 보증기간과 연계시키는 데 어려움이 있을 것으로 예상된다. 그러나 비슷한 공급자소비자 위험과 차별계수를 가진 고정기간 시험계획보다 시험기간을 줄일 수 있어 철도차량에 적용은 가능하다고 판단된다. 또한 시험계획 A는 스프레드시트에 의해 새로운 시험계획을 만드는 것도 용이하다.

고정기간시험은 시험기간이 고정되어 있어 철도차량과 같이 보증활동이 중요한 장치에서는 보증기간과 연계시킬 수 있어 장점이 있다. 무엇보다도 시험기간을 고정함으로써 이

해가 쉽고 관리가 용이하여 철도차량에서는 이 방법을 많이 사용한다. 이 시험은 합격불합격의 의사결정 뿐 아니라 시험에 의해 참 MTBF의 추정치가 필요한 경우에도 사용된다. 또한 공급자와 소비자위험, MTBF 상한값과 하한값, 그리고 시험기간 사이에서 절충(trade-off)이 가능하다는 장점도 있다. 또한 스프레드시트를 사용하면 새로운 시험계획을 용이하게 만들 수 있다.

전 장비 인수시험계획은 기본적으로는 PRST와 동일하다. 개발 장비에 대해 질적시험(QT)을 시행하고 생산방식이 해당 로트에 대해 신뢰성을 저하시키지 않았음을 보증하기 위한 시험이다. 이런 목적 때문에 이 시험에서는 불합격선을 넘어가는 경우에는 시험을 중단하고 교정활동을 한 후 다시 시험을 재착수하게 된다. 따라서 철도차량과 같이 실제 운영환경에서 영업운행에 투입되어 신뢰성을 검증하는 상황에는 적합하지 않은 시험으로 판단된다.

합성시험은 연속시험과 고정기간시험의 장점을 취한 시험이다. 그러나 관리가 어렵고, 중간 정도의 신뢰성을 갖는 시험대상에 대해서는 연속시험보다 시험기간이 길다. 시험계획 D는 반복프로세스(Iterative Process)에 의해 만들어져서 스프레드시트로 새로운 시험계획을 만들 수 없다. 이 시험은 불합격을 고정 시험기간 후 고장건수가 정해진 기준을 초과할 때만 불합격 되므로 공급자에게 유리한 시험법이라고 할 수 있다.

의의 신뢰성 시험방법에 대해 철도차량에 적용시의 장단점과 적용가능성에 대해 Table 2에 요약하였다.

#### 4. KTX 운영데이터를 이용한 신뢰성 검증

KTX의 1년 경과 후 월별 주행거리와 공급자 귀책 고장건수는 Table 3과 같다. 이 사례를 PRST와 고정기간시험법 그리고 합성시험에 의해 검증해보자. KTX는 110,000km

의 누적 열차거리(trainset kilometers) 또는 영업운행 4년간, 시험기간은 12개월로 나누어지고 시험의 마지막 12개월 동안 최소 수락 MKBSF는 121,000km이다. Fig. 1과 Fig. 3의 구체적인 숫자는 참고문헌 [2], [6]의 표의 숫자를 인용한다.

#### 4.1 확률비율 연속시험법(PRST)

PRST에서는 시험기간이 제일 긴 표준시험인 Fig. 1의 I-D를 이용하여 검증해본다.

##### 4.1.1 1개월 후

고장건수 12건에 대해, 누적주행거리 1,601,119km =  $13.2\theta_1 = T^*$ 은  $Tr^* = 7.64\theta_1 < T^* < Ta^* = 21.54\theta_1$ 이므로 Fig. 1에서 '시험계속'의 범주에 들어간다.

##### 4.1.2 2개월 후

누적고장건수 23건에 대해, 누적주행거리 3,272,244km =  $27.0\theta_1 = T^*$ 이고  $Tr^* = 21.02\theta_1 < T^* < Ta^* = 34.92\theta_1$ 이므로 '시험계속'의 범주에 들어간다.

##### 4.1.3 3개월 후

누적고장건수 33건에 대해, 누적주행거리 4,890,897km =  $40.4\theta_1 = T^*$ 이고  $Tr^* = 33.18\theta_1 < T^* < Ta^* = 47.08\theta_1$ 이므로 '시험계속'의 범주에 들어간다.

##### 4.1.4 4개월 후

이 경우 발생한 고장건수가 43건으로 시험계획 I-D의 시험 범위인 41건에서 벗어난다. 그러나 고장건수 43건, 누적주행거리 6,579,954km =  $54.4\theta_1 = T^*$ 을 고려하고 대략적인 추세로 보면 Fig. 1에서 '시험계속'의 범주에 들어간다고 할 수 있다.

Table 2. Comparison of Reliability Test Plans for the Application to Rolling Stocks

시험방법	장 점	단 점	철도차량 적용가능성
MTBF 보증시험	비교적 시험기간이 짧음	철도차량과 같이 납품된 전편성에 적용시 무고장기간 적용 어려움	적용 어려움
PRST	시험기간이 짧음 A시험계획은 간단하게 새로운 시험계획 설계가 용이	시험기간 예측 어려움 시험관리가 어려움 중간정도의 신뢰도에 대해서는 시험기간 길어짐	철도차량에 적용 가능
고정기간시험	시험기간이 고정되어 관리 용이 $\alpha, \beta$ , 상하한값 사이의 절충에 의한 시험계획 가능	고신뢰도, 저신뢰도 제품에 대해서는 시험기간이 매우 길어짐	철도차량에 적용 가능 (현재는 대부분의 철도차량에서 적용)
전장비 인수시험	기본적으로는 PRST와 동일	불합격선을 넘어가는 경우 시험을 중단하고 교정활동 후 재시험	철도차량 운영환경에 부적합
합성시험	PRST와 고정기간시험의 장점을 취한 시험법 시험기간이 짧음	복잡해서 시험관리가 어려움 공급자에게 유리	철도차량에 적용 가능

**4.1.5 5개월 후**

누적주행거리 8,260,434km = 68.30 $\theta_1$ 이고, 고장건수 50건이다. 범위에서는 벗어나지만 Fig. 1에서 ‘합격’의 범주에 들어간다고 할 수 있다.

**4.2 고정기간시험법**

Table 1의 고정기간 표준시험계획에서 신뢰성(MKBSF) 하한값  $\theta_1 = 121,000\text{km}$ 이고, 누적주행거리가 1,601,119km로서 첫째 달부터  $\theta_1$ 의 13배 이상임을 감안하여 표준시험 계획 IX-D( $\alpha=12.0\%$ ,  $\beta=9.9\%$ ,  $d=1.5$ )를 선택 하면, 시험기간(주행거리)은  $45\theta_1 = 45 \times 121,000 = 5,445,000\text{km}$ 이다. 이 누적 주행거리에서 발생한 고장건수가 37건 이상이면 불합격, 36건 이하이면 합격이다.

Table 3에서 이 주행거리는 3개월과 4개월 사이에 발생했으며, 3개월째는 누적 고장건수 33건, 4개월째는 43건이다. 대략적 보간법을 적용하면 5,445,000km에 대해 약 36.3건 정도가 나온다. 따라서 3~4개월째의 신뢰성은 합격과 불합격의 경계에 있다고 할 수 있다.

KTX의 신뢰성 입증기간이 1년임을 감안하면 최종 12개월째의 누적주행거리(19,946,701km)와 누적고장건수(119건)를 사용해야 하지만, MIL\_HDBK\_781D에서 제공하는 표준시험계획은 시험기간이 최장  $45\theta_1=5,445,000\text{km}$ 이므로 표준시험의 범위에서 벗어난다.

**4.3 합성시험법**

합성시험법에서는 8개의 시험중에서 시험기간이 제일 긴 Fig. 3의 시험계획 D-1을 이용해 보기로 한다. 여기에서의 시험기간은 목표신뢰성의 배수이지만, KTX의 121,000km를 목표신뢰도라고 가정하고 검증해본다.

**4.3.1 1개월 후**

고장건수 12건에 대해, 누적주행거리 1,601,119km =

$13.2m_0 = T^*$ 은  $Tr^* = 0 < T^* < Ta^* = 16.851m_0$ 이므로 ‘시험계속’의 범주에 들어간다.

**4.1.2 2개월 후**

누적고장건수 23건에 대해, 누적주행거리 3,272,244km =  $27.0m_0 = T^*$ 이고  $T^* > Ta^* = 23.228m_0$ 이므로 ‘합격’이다.

**4.4 검증결과의 비교**

KTX의 운영데이터를 이용하여 세 가지 검증방법에 대해 적용한 결과, PRST에서는 5개월, 고정기간시험법에서는 4개월, 그리고 합성시험법에서는 2개월째 ‘합격’되는 것으로 나타났다. KTX의 실제 상황에서는 고정기간시험법을 사용하여 1년간의 MKBSF가 목표값인 121,000km를 초과하여 167,619km를 나타냄으로서 신뢰성 목표값을 달성하였다. 앞에서 시험방법의 일반적인 평가에서 기술했듯이 합성시험법은 공급자에게 유리하게 2개월이라는 짧은 기간에 ‘합격’으로 판정했다. 운영자 입장에서 이 합성시험법은 양산 철도차량의 신뢰성 입증시험으로 채택하기는 어려울 것이라고 판단된다.

**5. 철도차량의 신뢰성 입증 시험의 요구사항**

3, 4장에서는 기존의 신뢰성 시험 방법을 평가하고 KTX 운영 데이터를 적용하여 각 시험의 특성을 살펴보았다. 이러한 신뢰성 시험 방법들을 신뢰성 입증 시험에 적용할 때에는 반드시 준수하여야 사항들이 있다. 이와 관련하여 IEC 60300-3-5는 일반적인 아이템에 대한 신뢰성 적합 시험의 요구사항을 기술하고 있다[4]. 본 장에서는 철도차량의 신뢰성 입증 시험에 대한 요구사항을 제시한다. 이러한 요구사항은 계약서 또는 사양에서 기술되어야 하며 다음의 사항들을 포함하여야 한다.

Table 3. KTX의 월별 주행거리 및 공급자 귀책 고장건수

월별	1개월	2개월	3개월	4개월	5개월	6개월
주행거리(km)	1,601,119	1,671,125	1,618,653	1,689,057	1,680,480	1,636,417
고장건수	12	11	10	10	7	8
누적주행거리(km)	1,601,119	3,272,244	4,890,897	6,579,954	8,260,434	9,896,851
누적고장건수	12	23	33	43	50	58
월별	7개월	8개월	9개월	10개월	11개월	12개월
주행거리(km)	1,694,373	1,674,503	1,741,283	1,764,909	1,569,689	1,605,093
고장건수	9	12	13	8	11	8
누적주행거리(km)	11,591,224	13,265,727	15,007,010	16,771,919	18,341,608	19,946,701
누적고장건수	67	79	92	100	111	119

- 1) 입증될 대상 아이템의 종류 및 신뢰도 척도, 수락 기준 값
  - 입증 시험에서 사용될 대상 아이템의 종류(편성 또는 차량), 신뢰도 척도(MKBSF, MKBF 등), 수락 기준(00km 등)은 정량적 신뢰성 요구사항과 일치하여야 한다.
- 2) 시험될 아이템의 샘플의 수 및 선정 방법
  - 철도차량의 신뢰성 입증은 시험운행 또는 영업운행 기간에서 수행하므로 운행되는 모든 편성(또는 차량)을 대상으로 시험을 수행하는 것이 바람직하다.
- 3) 초기 안정화 기간의 선정
  - 철도차량의 운영을 위해서는 지상 신호장치와 같은 철도차량외의 시스템과 많은 인터페이스가 필요하므로 초기 안정화 기간이 필요하다.
  - 영업운행중에 초기 안정화 기간이 필요한 경우에는 가능한 범위 내에서 짧은 기간을 설정하는 것이 바람직하다.
- 4) 사용할 시험 방법의 선택
  - 2장에서 기술한 시험과 같은 시험 방법을 선정한다.
- 5) 시험의 임무 프로파일 정의
  - IEC 62278 및 PD CLC/TR 50126-3의 임무 프로파일 일을 정의방법에 따라 입증 시험에서 사용될 임무 프로파일을 정의한다.
  - 신뢰성 척도 계산에 사용되는 운행 시간(또는 거리)에 포함되는 관련 시간을 정의한다.
- 6) 운영 및 환경조건과 유지보수 조건의 정의
- 7) 고장의 범주 정의
  - 평가할 신뢰성 척도에 따라 서비스 고장 등의 범주 및 각 범주의 정의를 기술한다.
  - 차량 공급자의 책임이 아닌 고장을 정의한다.

## 6. 결론

철도차량을 구매하는 데 있어서 신뢰성 요구조건을 설정하고 공급자에게 제시한 후 납품 시 신뢰성 요구조건을 만

족했는지를 입증하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 신뢰성을 검증하는 여러 가지 방법과 특성에 대해 기술하고, 철도차량에 적용 가능한 입증방법에 대한 평가를 했다. 또한 실제 철도차량에서 발생한 운영데이터를 세 가지 입증방법에 적용하여 그 타당성을 검증해 보았고, 입증시험의 요구사항을 기술해 보았다.

신뢰성 입증의 대상이 되는 철도차량은 대량수송용이고 서비스고장에 매우 민감하며, 그 수명이 장기간임을 감안하면 차량납품 시 설정된 신뢰성이 확보되도록 입증하는 것은 일반적인 산업의 장비들에서 보다 더욱 중요하다. 향후 연구에서는 신뢰성 입증기간과 공급자소비자 위험 그리고 신뢰성 목표값을 고려한 철도차량에 가장 적합한 신뢰성 입증모델을 개발하고자 한다.

## 참고 문헌

1. Bazofsky, I. (1963) Reliability Theory and Practice, Prentice Hall.
2. Department of Defense (1996), MIL-HDBK-781D, Handbook for Reliability Test Methods, Plan, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production, pp 16-18, pp 32-54.
3. GEC ALSTHOM TRANSPORT SA, Dec. (1995), Rolling Stock Reliability/Maintainability Plan, pp. 33.
4. International Electrotechnical Commission (2001), IEC60300-3-5, Dependability management - Part 3-5: Application Guide - Reliability Test conditions and statistical test principles, pp. 53-55.
5. International Electrotechnical Commission (1991), IEC61123, Reliability Testing - Compliance Tests plans for success ratio.
6. International Electrotechnical Commission (2006), IEC61124, Reliability Testing - Compliance Tests for Constant Failure Rate and Constant Failure Intensity, pp 47-49, pp. 121-123.
7. Schmee, I. and Bryant, C. M. (1979), "Confidence Limits on MTBF for Sequential Test Plans of MIL-STD-781," *Technometrics*. Vol 21, No. 1.

접수일(2008년 2월 29일), 수정일(2008년 6월 19일), 게재확정일(2008년 6월 19일)