

운영자 관점에서의 철도차량의 고정기간 신뢰성 입증 시험의 설계

A design of the fixed duration reliability demonstration test from the viewpoint of operators

김종운† 정인수* 박준서**
Kim, Jong-Woon Chung, Insoo Park, Jun-Seo

ABSTRACT

The fixed duration test has been widely used in the reliability demonstration test for rolling stocks. This article deals with how to design the test statistics, acceptance criteria and the fixed duration of the MTBF(Mean Time Between Failures) demonstration test considering the consumer risk. Numerical examples are given to illustrate the dependence of the consumer risk on the test duration and MTBF requirement.

1. 서 론

정량적 신뢰성 지표는 철도차량의 품질을 나타내는 중요한 척도이다. 따라서 국내외의 철도운영사에서는 높은 품질의 철도차량을 획득하고자 구매사양서에 정량적 신뢰성 요구사항을 제시하고 이에 대한 달성과 입증을 철도차량 공급자에게 요구하고 있다.[4] 운영사가 높은 신뢰성을 가진 철도차량을 획득하기 위해서는 적합한 신뢰성 요구사항을 설정하고 이를 검증하는 것이 필요하다. 정인수 등[4]은 철도차량의 정량적 신뢰성, 가용성, 유지보수성 목표값을 설정하는 방법에 대해 연구하였다. 또한 정인수 등[2]은 철도차량의 정량적 신뢰성 요구사항의 입증하기 위해 MIL-HDBK-781D[1]의 신뢰성 검증 방법의 적용 방법 및 사례를 소개하였다. 정인수 등[2]은 MIL-HDBK-781D[1]의 신뢰성 검증 방법 중 확률비율연속시험(Probability Ratio Sequential Test), 고정기간시험, 합성시험이 철도차량의 신뢰성 검증에 적용할 수 있다고 하였다. 현재 철도차량의 신뢰성 입증 절차와 가장 유사한 시험은 고정기간시험법이다. 그러나 철도차량의 신뢰성 입증 시험 방법은 신뢰성 요구사항 값과 함께 발주자가 제시하여야 하는데 기존의 고정기간시험법은 평균고장간격과 같은 신뢰성 척도의 상한값과 하한값 및 소비자위험과 생산자위험 모두를 결정하여야 하는데 발주자가 상한값과 생산자위험을 결정하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 생산자 위험은 정량적으로 고려하지 않고 운영자 관점에서 소비자 위험만을 고려하여 고정기간 신뢰성 입증 시험을 설계하는 문제를 다룬다. 정량적 신뢰성 요구사항의 척도로는 MDBSF(Mean Distance Between Service Failures), MDBLF(Mean Distance Between Logistic Failures), MTBSF(Mean Time Between Service Failure), MTBLF(Mean Time Between Logistic Failures) 등이 있지만[3] 각 척도에 대한 신뢰성 검증 방법은 동일하기 때문에 신뢰성 목표는 MTBF(Mean Time Between Failures)로 주어졌다고 가정한다. 본 논문에서 사용하는 기호는 아래와 같다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 선임연구원
E-mail : jong@krii.re.kr5
TEL : (031)460-5222 FAX : (31)460-5279
* 정희원, KORAIL, 코레일연구원, 원장
** 정희원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 책임연구원

<기 호>

- 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(또는 거리)
- λ : 철도차량의 실제 고장률
- θ_0 : 철도차량의 MTBF 목표
- θ_1 : 철도차량 입증시험에서의 MTBF 수락값(구매 사양서에의 MTBF 요구사항 값)
- $\hat{\theta}$: 입증시험을 통한 MTBF의 추정치

2. 고정기간 신뢰성 입증 시험의 설계

일반적으로 수행되고 있는 철도차량의 신뢰성(MTBF) 입증은 신뢰성 입증시험 기간 동안의 총 운행시간(t^*)동안 발생한 고장을 바탕으로 MTBF(θ)를 추정하고 이 추정치 $\hat{\theta}$ 이 MTBF 수락 조건, θ_1 보다 크면 수락되는 절차에 의해 이루어진다. 그리고 만약 추정치 $\hat{\theta}$ 이 θ_1 보다 작으면 즉시 불합격되는 것이 아니라 일정기간(예: 1개월) 시험기간이 연장된다. 연장된 시험기간의 종료 시점에서 가장 최근의 t^* 기간의 운행시간동안의 고장에 의해 $\hat{\theta}$ 이 재 추정되며, 이러한 절차는 신뢰성 수락 조건($\hat{\theta} \geq \theta_1$)이 만족될 때까지 계속 진행된다. 이 때 처음 설정된 신뢰성 입증 기간이 연장되면 이에 따른 패널티가 차량공급자에게 부과된다.

이러한 철도차량의 신뢰성 고정기간 시험은 MIL-HDBK-781D[1]의 고정기간 시험과는 일부 상이하다. 기존의 고정기간시험에서는 고정기간의 시험 후 수락기준을 불만족하면 시험에 불합격되지만 현재 수행되고 있는 철도차량의 고정기간 신뢰성 입증 시험에서는 합격되지 않으면 일정기간만큼 시험기간이 계속 연장되기 때문이다. 그 이유는 철도차량의 신뢰성 목표를 만족하지 못하였다고 하더라도 사용자는 계획된 철도서비스를 제공하기 위하여 다른 철도차량을 즉시 구매할 수 없기 때문이다.

따라서 공급된 철도차량의 MTBF(θ)가 θ_1 보다 큼에도 불구하고 신뢰성 입증시험에 불합격할 확률인 공급자 위험은 0에 수렴하고, 공급된 철도차량의 MTBF(θ)가 θ_0 보다 작음에도 불구하고 신뢰성 입증시험에 합격할 확률인 소비자 위험은 매우 커진다. 그러나 시험기간이 연장됨에 따라 패널티가 부과되기 때문에 차량 공급자는 부과되는 패널티 만큼의 위험을 가지게 되고, 소비자는 시험기간이 계속 연장됨에 따라 증가되는 소비자 위험을 부과하는 패널티를 통해 경감할 수 있다. 또한 생산자 위험을 결정하기 위해서는 MTBF 상한값을 결정해야 하는데 이 값은 소비자가 결정하기는 매우 어렵기 때문에, 적절한 생산자 위험을 소비자가 결정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 철도차량의 고정기간 신뢰성 시험을 설계할 때 공급자 위험은 고려하지 않는다. 소비자 위험은 초기 설정된 신뢰성 입증 시험의 종료시점에서의 위험만을 고려한다.

위와 같은 가정하에서 고정기간 신뢰성 시험을 설계하기 위해 결정해야 할 요소는 1) 초기 입증시험 기간 t^* 에서의 소비자 위험, 2) 전체 편성의 총 입증시험시간(또는 거리), 3) MTBF 추정 방법, 4) MTBF 수락값, θ_1 (구매 사양서에의 MTBF 요구사항 값)이다. 이 4가지 결정 요소 중 MTBF 추정방법이 결정되면 나머지 소비자 위험, 전체편성의 총 운행시간, MTBF 수락값은 상호 절충(trade-off)을 통

해 결정될 수 있다. MTBF 추정은 지수분포의 모수($\theta=MTBF$) 추정에 가장 널리 사용되는 최우추정법을 사용한다. 철도차량의 신뢰성 입증시험에서 i 번째 편성의 입증시험기간의 데이터는 그림 1과 같이 얻어진다.

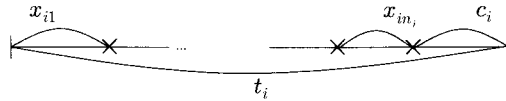


그림 1. 신뢰성 입증 시험에서의 데이터 구조

위의 그림과 같이 전체 m 편성에 대해 고장데이터가 주어졌을 때의 최우추정치 $\hat{\theta}$ 은 다음과 같다.

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

따라서 고장률에 대한 신뢰성 입증은 아래의 식과 같이 총 운행시간(거리)/총 고장개수가 요구되는 MTBF 값 이상인지를 입증하는 것으로 이루어진다.

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

MTBF 추정방법이 결정되면 MTBF 수락값이 결정되어야 한다. 철도차량의 MTBF 수락값(θ_1)은 구매사양서에서 MTBF 요구사항으로 제시된다. MTBF 수락값(θ_1)은 신뢰성 입증 시험에서 철도차량의 실제 MTBF(θ)가 MTBF 목표(θ_0)보다 작음에도 신뢰성 입증 시험에서 초기 입증시험기간 t^* 후 시험의 연장 없이 수락될 확률인 소비자 위험을 고려하여 결정되어야 한다. 따라서 θ_1, t^* , 소비자 위험은 상호 절충 분석을 통해 결정되어야 한다.

고정기간 신뢰성 입증시험에서 고장은 포아송과정을 따르므로 입증시험기간 동안의 전체 편성의 총 고장개수(N^*)는 평균이 λt^* 인 포아송분포를 따르는 확률변수이다. 그러므로 소비자 위험은 다음과 같이 계산된다.

• 소비자위험: $\Pr[N^* \leq t^*/\theta_1 | \theta \leq \theta_0]$

위의 위험은 모두 MTBF가 θ_0 에 가까울수록 커지므로 $\theta = \theta_0$ 일 때 소비자 위험을 구하면 다음과 같다.

$$\Pr[N^* \leq t^*/\theta_1 | \theta = \theta_0] = \sum_{y=0}^{[t^*/\theta_1]} \frac{e^{-t^*/\theta_0} (t^*/\theta_0)^y}{y!}$$

[y]는 y를 넘지 않는 최대 정수

위의 식에서 소비자 위험은 $t^*/\theta_0, t^*/\theta_1$ 에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 θ_0, θ_1, t^* 의 비가 일정하다면 소비자 위험은 일정함을 알 수 있다.

아래의 표 1은 $\theta_0=100$, $\theta_1=110$ 즉 MTBF 목표는 100시간 이고 구매 사양서의 MTBF 요구사항 값 (MTBF 수락값)은 110일 경우 총 시험운행시간에 따른 소비자 위험을 나타낸다. 표1에서와 같이 소비자 위험은 총 시험운행시간이 증가함에 따라 감소하며 감소기울기는 대체적으로 작아진다는 것을 알 수 있다. 표 2는 $\theta_0=100$, $t^*=1000$ 인 경우에 MTBF 수락값 θ_1 에 따른 소비자 위험을 나타낸다. 표 2에서와 같이 MTBF 수락값이 증가할수록 소비자 위험은 같거나 작아짐을 알 수 있다. 그 이유는 θ_0 , t^* 이 고정되어 있으므로 소비자 위험은 합격고장개수 상한, $[t^*/\theta_1]$ 의 값에 따라 달라지며 θ_1 이 증가할 때 $[t^*/\theta_1]$ 은 작거나 같아지게 되기 때문이다. 따라서 θ_1 , t^* , 소비자 위험은 위의 특성들을 고려하여 상호 절충 분석을 통해 결정되어야 한다.

도표 1. 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 |

도표 2. MTBF 수락값에 따른 소비자 위험($\theta_0=100$, $t^*=1000$)

| MTBF 수락값 θ_1 | 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 |
| 180 | 5 | 0.0671 |
| 190 | 5 | 0.0671 |
| 200 | 5 | 0.0671 |
| 210 | 4 | 0.0293 |
| 220 | 4 | 0.0293 |
| 230 | 4 | 0.0293 |
| 240 | 4 | 0.0293 |
| 250 | 4 | 0.0293 |
| 260 | 3 | 0.0103 |

3. 결 론

본 연구에서는 생산자 위험은 정량적으로 고려하지 않고 운영자 관점에서 소비자 위험만을 고려하여 고정기간 신뢰성 입증 시험을 설계하는 문제를 다루었다. 생산자 위험이 정량적으로 고려되지 않은 이유는 MTBF 상한값과 생산자 위험을 사용자가 결정하기가 어렵고, 기존 고정기간 신뢰성 입증 시험과 달리 철도차량의 신뢰성 입증은 입증시험기간의 데이터를 통해 합격되지 않으면 불합격되는 것이 아니라 입증시험기간이 연장되기 때문에 생산자 위험 확률은 매우 작아지게 때문이다.

제안되는 신뢰성 입증 방법은 최우추정법에 의한 MTBF의 추정치가 MTBF 수락값 이상이면 합격이고 이하이면 시험이 계속 진행되는 것이다. 이 때 입증시험에서의 총 운행시간과 MTBF 수락기준을 결정하여야 하며, 이는 소비자 위험을 고려하여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 이 세 가지 값에 대한 상호관계식을 제안하였다. 수치예제를 통해 소비자 위험은 총 시험운행시간이 증가함에 따라 감소하며 감소기울기는 대체적으로 작아지고 MTBF 수락값이 증가할수록 소비자 위험은 같거나 작아짐을 알 수 있었다.

신뢰성 입증은 신뢰성 목표 설정과 더불어 운영자가 높은 신뢰성을 가진 철도차량을 획득하기 위해 가장 중요한 부분이다. 따라서 MTBF 수락값은 현재의 기술수준을 고려하여 생산자가 공급 가능한 값을 설정하고 소비자 위험이 충분히 낮아지도록 입증시험기간을 설정하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. MIL-HDBK-781D (1996), Handbook for Reliability Test Methods, Plan, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production, Department of Defense.
2. 정인수, 김종운, 이강원 (2008), “철도차량 정량적 신뢰성 요구사항의 입증 시험에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, 제11권 제3호, pp.233-239.
3. 정인수, 이강원, 김종운 (2008), “철도차량의 구매 요구사항에 포함하는 RAMS 특성값에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, 제11권 제4호, pp. 371~377.
4. 정인수, 이강원, 김종운 (2008), “철도차량 정량적 신뢰성 · 가용성 · 유지보수성(RAM) 목표값 설정에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, 제11권 제4호, pp. 390~397.