

경량전철시스템 신뢰성 향상방안
A Study on the Reliability Improvement of LRT(Light Rail Transit)

*김종걸, **한석윤, *전봉룡
*Jong-Gurl, Kim, **Suk-Yun Han, *Bong-Roong, Jun

ABSTRACT

Special, high technology developments and systems improvements become more necessary as the industrial society is becoming complex. When some systems are developed, it is common that developed systems have low-reliability in infant period. Some developed systems need tests to improve their reliability up to the respected level before adapting them.

This paper aims at showing the testing program including the reliability growth model for reliability improvement of the Light Rail Transit

Key words : LRT, MTBF, MDBF, Reliability growth, Duane

1. 서론

현대의 산업사회는 그 구조가 복잡해지고 전문화됨에 따라 고도의 기술개발을 필요로 하고 또한 시스템의 개선을 요구하고 있다. 최근 시스템의 신뢰성이 향상되고 있지만, 부품에 잠재하는 결함과 시스템의 고장으로 인한 대형사고 유발은 시스템의 기능에 따라서는 생산기업의 경쟁력을 넘어 도덕적인 문제로 사회적 비판을 받고 있다.

흔히 현대는 정보화 사회로서 기반시설에 컴퓨터가 많이 이용되고 있다. 이러한 시스템에서 고장이 발생할 때 그로 인한 영향은 시스템의 운용환경에 따라 개인적인 손실뿐만 아니라, 사회전반에 걸쳐 영향을 주게 된다. 특히 시스템의 고장이 사회적인 문제를 야기할 수 있는 시스템(원자력 발전시설, 교통관련 시스템 등)이라면, 시스템의 신뢰성은 더욱 강조된다. 어떤 새로운 시스템을 개발했을 때 새로 개발된 시스템은 원래의 시스템보다 처음에는 일반적으로 신뢰성이 떨어진다고 알려져 있다. 그러므로 새로운 시스템을 사용단계에 들어가기 전에 시스템의 신뢰성을 원하는 수준만큼 증가시키기 위하여 테스트를 하게 된다.

본 논문에서는 도시교통 체증의 개선을 위해 국내 최초 개발된 경량전철시스템의 신뢰성을 증가시키기 위한 테스트 프로그램으로 신뢰성 성장 모형에 관하여 연구하고자 한다.

* 성균관대학교 시스템경영공학부

** 한국철도기술연구원

2. 경량전철시스템의 신뢰성 모형

2.1 가정

- 1) 경량전철 시스템의 네 가지 하위 시스템(sub-system)은 모두 직렬(series) 구조로 결합되어 있으며 고장이 발생할 경우 고장원인은 명확하게 네 가지 하위 시스템 중 한 가지 또는 더 낮은 수준의 부품까지로 구분된다.
- 2) 각 하위 시스템을 구성하는 부품들과 하위 시스템의 고장률은 일정한 상수(CFR, constant failure rate)이며, 독립이다. 즉, 각 부품의 수명분포는 지수분포를 따른다.
- 3) λ (고장률, failure rate)은 평균고장간격(mean time between failure, MTBF)의 역수, 또는 평균속도를 평균고장거리(mean distance between failure, MDBF)로 나눈 값으로 구할 수 있다. 즉, 다음 식 (1), 식 (2)와 같다.[3]

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{\text{평균속도}}{MDBF} \dots\dots\dots (1)$$

$$MTBF = \frac{\text{시험 기간동안 차량운행 시간(또는 거리)}}{\text{시험 기간동안 고장발생 수}} \dots\dots\dots (2)$$

- 4) 신뢰성 평가 대상은 경량전철시스템의 차량시스템으로 한정한다.

2.2 경량전철시스템의 목표신뢰도

경량전철시스템의 차량시스템의 예상수명은 도시철도법 기준에 따라 25년(정밀진단 후 5년 연장)이며 평균 연간운행거리 MKBF는 150,000km/년(약 411km/일)을 목표로 한다. 경량전철시스템의 목표신뢰도를 설정하고 하부 시스템별로 목표신뢰도를 배분하기 위해서 PRT(Personal Rapid Transit), MPM(Morgantown People Mover) 및 기타 자료를 활용하였다. 주 대상이 되는 시험선 2량 1편성 차량시스템이 약 15만km를 주행할 때 관련고장 또는 운행지연 고장이 발생하는 횟수를 1회로 하는 것을 목표로 하고 있어 고 신뢰성 차량시스템을 운행하기 위해서는 체계적인 보전활동이 필요하다. 아래의 <표 1>과 <그림 1>은 시험선의 운행조건 방식과 운행될 차량시스템이다.[1]

<표 1> 시험선의 운행조건과 방식

| 항 목 | 내 용 |
|-----------|------------|
| 1일 평균주행거리 | 448km/일 이상 |
| 1일 평균왕복회수 | 120회/일 이상 |
| 1일 평균운행시간 | 10시간 |
| 편성 차량 | 2량 1편성 |
| 표정 속도 | 30km/h 이상 |



<그림 1> 시험선에서 운행될 차량시스템

<표 2> 차량시스템의 하위 시스템에 관한 고장률과 신뢰도 계산

| System | 고장률 | 신뢰도($t=115$) | MTBF |
|-----------|----------|----------------|----------|
| R_1 | 0.000516 | 0.9423 | 1,937h |
| R_2 | 0.000320 | 0.9639 | 3,129h |
| R_3 | 0.000012 | 0.9986 | 81,723h |
| R_4 | 0.000006 | 0.9993 | 163,421h |
| R_5 | 0.000018 | 0.9979 | 54,810h |
| R_6 | 0.000012 | 0.9987 | 85,993h |
| R_7 | 0.0 | 1 | - |
| R_8 | 0.0 | 1 | - |
| R_9 | 0.0 | 1 | - |
| R_{sys} | 0.000884 | 0.9033 | 1,131h |

단, 신뢰도 115시간은 표준전동차의 차량편성 목표신뢰도 값을 고려하여 계산함.

계산한 결과 차량시스템의 고장률은 0.000884로 추정되었다. 그러나 차량시스템 개발 목표사양에서 정의한 신뢰성은 15만km를 주행하는 경우 한번 고장이 발생하는 것을 목표로 함으로 목표고장률은 0.0003004가 되어야 한다. 따라서 목표신뢰도에 도달하기 위해서는 시험선에서 시험 시 신뢰성 향상을 위해 면밀한 대책수립이 필요하다.[2],[4]

4. 경량전철 시스템 신뢰성 향상 방안

4.1 신뢰성 성장시험의 필요성

새로 개발된 시스템은 일반적으로 기존의 시스템보다 처음에는 신뢰성이 떨어진다. 그러나 설계능력(Design capability)과 학습능력(Learning ability)으로 테스트를 통해 단기간에 높은 신뢰성 수준을 유지할 수 있게 되었다. 그런데 새로 개발된 시스템의 신뢰성을 어느 정도의 수준까지 테스트 할 것인가가 중요한 문제가 된다. 즉 테스트 프로그램에서 테스트시간(Reliability growth test time)을 얼마나 오랫동안 할 것인가가 중요한 요인이 된다. 시스템의 신뢰성을 무한정 높이자면 많은 시간과 비용이 들고, 신뢰성이 너무 낮으면 시스템의 능력에 문제가 있으므로 새로운 시스템의 가치가 떨어지게 된다. 그러므로 본장에서는 실험시간에 의한 신뢰성 성장 모형에 대해 원하는 신뢰성 수준까지 달성하는데 걸리는 테스트 가간을 구하는 방법을 모색하고자 한다.[8]

4.2 신뢰성 성장 모형

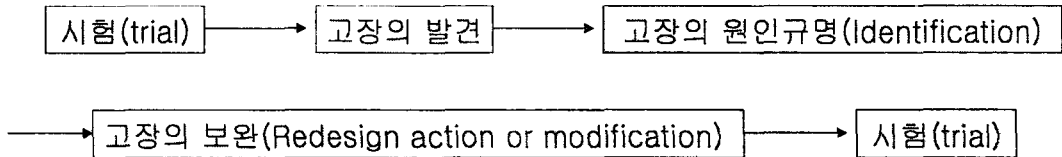
4.2.1 실험회수에 의한 모형

이 모형에서는 테스트후의 결과를 성공 혹은 실패의 두 가지 결과만 가정한다.

이 경우의 시스템은 비교적 간단하여 테스트 후 실패하였을 때 시스템을 발전시키기 위해 그 원인을 발견하여 재설계하게 된다. 어떤 시험에서 시스템이 성공적으로 작동

하게 되면 다음 시험 이전에 재설계를 하지 않고 실패하면 재설계 행위를 하게 되는데 이때 재설계가 실패하였을 때 다음 시험에서 시스템이 다시 고장 날 확률에는 아무런 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

테스트 단계를 간단히 설명하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 실험횟수에 의한 모형의 테스트 단계

이 모형에 속하는 대표적인 것은 Lloyd-Lipow의 모형이 있다.

4.2.2 실험시간에 의한 모형

실험시간에 의한 모형은 실험환경을 변경시켜 어떤 항목에 대해 테스트 하는 것이 아니라 완전한 시스템을 자연상태 그대로 시운전 하는 것이다. 시간이 흐름에 따라 자연히 발생하는 설계결함을 발견하여 보완해 줌으로써 신뢰성 성장이 이루어진다. 즉 위험률(hazard rate) 혹은 고장률(failure rate)은 시간의 함수로 주어진다. 여기에 속하는 대표적인 모형으로 J.T Duane가 만든 듀안(Duane)모형과 미육군물자체계분석단의 Dr.Larry에 의해 만들어진 암사(AMSAA)모형이 있다.[9],[10]

<표 3> 신뢰성 성장 모델

| Duane 모델 | | AMSAA 모델 | |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|---|
| 누적 고장률 | 순간고장률 | 누적 고장률 | 순간고장률 |
| $\lambda_{cum} = KT^{-\alpha}$ | $\lambda_{inst} = K(1-\alpha)T^{-\alpha}$ | $\lambda_{cum} = \lambda T^{\beta-1}$ | $\lambda_{inst} = \lambda\beta T^{\beta-1}$ |
| α : 성장률 | α : 성장률 | β : 성장률 | β : 성장률 |
| K: 초기 고장률 | K: 초기 고장률 | λ : 초기 고장률 | λ : 초기 고장률 |
| T: 테스트 시간 | T: 테스트 시간 | T: 테스트 시간 | T: 테스트 시간 |

4.3 테스트시간(Growth test time)의 추정방법

4.3.1 위험률(Hazard rate)에 의한 방법

위험률 $h(t)$ 가 어떤 값 x 보다 작게 되는 테스트 시간을 $T_x(h)$ 라고 할 때 $T_x(h)$ 에 해당하는 테스트 시간을 구하는 방법이다. 여기서 x 값은 시스템의 초기 위험률을 기준으로 결정한다. 예를 들어 시스템의 위험률의 초기 위험률의 a 배가 될 때까지의 테스트 시간을 구하는 방법이다.

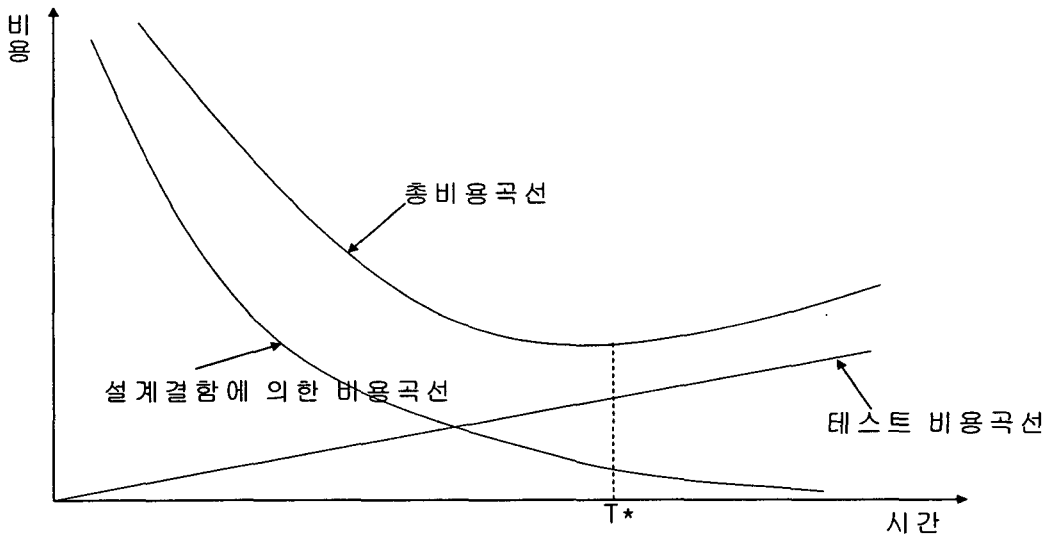
4.3.2 위험률 비(Hazard rate ratio)에 의한 방법

위험률 $h(t)$ 가 볼록(convex)일 때 DFR(Decreasing Failure Rate)이다. 이 때 위험률의 변화율은 점차 줄어든다. 그러므로 테스트 시간을 일정하게 나눌 때 각 구간의 변화율을 구하는 방법을 생각할 수 있다. 즉 각 구간의 변화율의 비가 거의 일정하여 위험률의 감소율이 거의 변화지 않게 되는 테스트 시간을 구하는 방법이다. 이 때 그 구간의 변화율은 1에 아주 가깝게 될 것이다.

4.3.3 비용을 고려한 방법

테스트 시간을 늘리면 늘릴수록 테스트하는 비용이 점점 증가할 것이다. 그러나 그만큼 설계결함의 고장수를 더 많이 발견하여 위험률을 줄일 수 있으므로 설계결함이 발생했을 때 드는 비용은 줄어들 것이다.

그러므로 두 비용 간에는 서로 역 비례하는 관계를 가지고 있다.



<그림 3> 시간에 따른 비용곡선

<그림 3>에서 보는 바와 같이 비용을 최소화 하는 테스트 시간은 테스트에 드는 비용과 설계결함에 의한 비용의 총비용이 최소가 되는 점이다. 이때의 시간을 T^* 라 두면,

테스트 시간당 비용을 c_1 이라 할 때 테스트 총비용은 $c_1 T^*$ 이다. T^* 까지 테스트 할 때 아직까지 남아있는 설계결함의 수는 총 고장수 N 에서 T^* 까지의 고장수를 뺀 것이다. 설계결함의 총 고장은 언제 가는 모두 발생된다고 가정하고 설계결함이 한번 발생할 때마다 손해 보는 비용을 c_2 라 하면 설계결함에 의한 총비용은 $c_2[N - n(T^*)]$

다.[5]

그러므로 총비용은

$$f(T^*) = c_1 T^* + c_2 [N - n(T^*)]$$

T^* 를 구하기 위해서 $f(T^*)$ 를 T^* 에 대해 미분하면

$$\frac{df(T^*)}{dT^*} = c_1 - c_2 \frac{dn(T^*)}{dT^*}$$

여기서 테스트 시간당 드는 비용 c_1 이 아주 적을 때는 비용을 최소로 하는 test 시간 T^* 는 무한하게 커질 것이다. 이것은 새로운 시스템의 필요성이 강력히 요구될 때 현실적으로 부적합하다. 이때에는 기존의 시스템을 쓰는 것보다 새로운 시스템을 사용함으로써 얻는 이익을 고려해 주는 또 다른 요인을 생각해 주어야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 먼저 경량전철시스템의 차량시스템에 대한 각 하위 시스템의 유사규격 신뢰도 정보를 이용하여 차량시스템의 신뢰도를 계산하여, 계산된 신뢰도를 목표신뢰도와 비교하여 보았다. 그리고 경량전철 시스템의 신뢰성 향상 방안으로 실험시간에 의한 신뢰성 성장모형에 대해서 테스트 시간을 구하는 방법을 모색해 보았다. 위험률에 의한 테스트 시간 추정방법은 엔지니어나 시스템 설계자의 경험에 의해서 결정된다. 그러므로 이 방법들로 구한 테스트 시간은 최적 테스트 시간이라고는 할 수 없다. 마지막으로 설계결함의 비용과 테스트 시간에 의한 비용이 최소가 되는 테스트 시간을 구하는 방법에 대해 모색해 보았는데, 새로운 시스템을 사용함으로써 얻는 이익을 고려하자 않아서 최적이라고는 볼 수 없다. 그러나 앞에서 설명한 방법들은 테스트 계획자들에게 테스트 시간에 대한 기준을 제시 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 한석운, 이안호 외 다수, 경량전철기술개발사업 1차년도5차년도 연구결과보고서 : 종합시스템 엔지니어링, 한국철도기술연구원, 19992003
- [2] 구병춘 외 4, "표준전동차 RAMS 평가 연구", 도시철도표준화 연구개발사업 완료보고서, 한국철도기술연구원, 2001.
- [3] 신무송, 김필환, 구병춘, "전동차 신뢰성 모델 및 분석 방법", 2001년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.370375, 2001.

-
- [4] 구병춘, 김남포, “표준 전동차의 신뢰성 평가”, 2002년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.330335, 2002.
- [5] 서재준, “신뢰성 성장 모형에 관한 연구”, 서울대학교 산업대학원 석사학위논문, 1983,
- [6] G. L. Sriwastav, “A Reliability Growth Model,” IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-27, No. 5, December 1978
- [7] “Reliability Growth - Statistical Test and Estimation Methods,” IEC 1164, 1995.
- [8] MIL-HDBK-189, “Reliability Growth Management,” February 13, 1981.
- [9] Duane, J.T., “Learning Curve Approach to Reliability Monitoring,” IEEE Transactions on Aerospace, Vol. 2, No. 2, 1964.
- [10] “RAC Blueprints,” Volumes 1 and 6, Reliability Analysis Center, Rome, NY 1996.