

시스템의 개발 및 초기생산 단계에서의 신뢰성 성장관리

Reliability Growth Management in the Development and Initial Production of a System

Won Jung* · Hwan-Tae Lee**

ABSTRACT

Under development program for a complex system, the total system or major subsystems are tested to failure, system failure modes are analyzed, and design and engineering changes are made to eliminate these failure modes. If this TAAF(test-analyze-and-fix) process is continued, and modifications are made in a competent manner, then the system reliability increase.

This paper presents the reliability growth theory and applies it to some subsystems during their development and initial production testing. The application of these techniques is a part of the product assurance function that plays an important role in product reliability improvement. In addition, the EN 50126 requires essentially reliability growth for RAM growth monitoring.

1. 서론

새로운 기술이 적용되는 복잡한 시스템의 개발프로그램에 있어서는 고객이 승인할 수 있는 신뢰성 수준을 달성하기 위하여 시간, 예산, 그리고 인력 등 상당한 자원을 필요로 한다. 높은 기술이 요구되는 복합시스템의 신뢰성 요구수준은 매우 높으며, 이러한 높은 수준을 만족시키기 위해서는 개발기간 동안 TAAF (test-analyze-and-fix) 프로세스를 거치는 것이 일반적인 개발과정이다. 이 프로세스 동안, 시스템 또는 서브시스템에 대해 고장이 날 때 까지 시험을 행하고 고장이 나면, 분석하여 시스템의 고장모드를 결정하고, 이 고장모드를 제거하기 위하여 또는 적어도 발생율을 줄이기 위하여 설계 그리고/또는 엔지니어링 변경이 이루어진다. 이러한 프로세스가 계속되고, 상당한 기술적 방법으로 개선이 이루어지면, 시스템의 신뢰성은 증가한다.

개발프로그램이 운영되는 동안 신뢰성의 변화를 추적할 수 있다면 개발책임자로서는 여러 가지 잇점이 있다. 즉, 목표하는 신뢰성 수준을 달성하기 위하여 충분한 비율로 성장하고 있는지의 여부를 가능한 빠른 시간 내에 판단할 수 있고, 그에 따라 필요한 자원을 적절히 배분할 수가 있다. 따라서 개발프로그램 책임자는 시험데이터로부터 현재 시스템의 신뢰성 상태, 성장률의 평가, 앞으로 기대되는 달성 가능한 수준을 결정하기를 원한다.

그러나, 제한된 자원을 이용하여 개발기간 내에 성공적으로 신뢰성 목표를 달성하기 위해서는 성장프로세스 동안 데이터가 수집되었을 때 취할 수 있는 조치, 정보 사용방법, 정보사용자, 신뢰성 개선 계획 등 성장과정을 잘 관리하여야 한다. 신뢰성 성장관리는 개발 시험을 통해 신뢰성 문

* 대구대학교 산업시스템공학과 교수, 정희원

** TÜV Rheinland Korea, 정희원

제를 발견하는데 모든 자원을 효율적으로 집중한다. 이렇게 함으로서 신뢰성 성장과정은 개발프로그램에 있어서 집중적이고도 가시적인 부분이 되며, 시스템을 더 좋게 하려는 지속적인 전략이 뒤따르게 된다.

본 연구의 목적은 철도차량의 개발 및 초기생산단계에서 신뢰성 성장 이론의 적용방법을 보여 주는데 있다. 이러한 응용기술은 제품의 신뢰성향상에 중요한 역할을 하며 제품보증기능의 한 부분을 이루는 핵심기술 중의 하나이다.

최근 RAMS 요구사항에 대한 국제적인 수준이 점점 높아지고 있어 이에 대한 적극적인 대응이 필요하다. CENELEC(유럽전자기술표준화위원회)의 EN50126과 이를 근간으로 한 IEC 62278 Railway applications 등은 시스템 수명 사이클을 통해 RAMS를 위한 시스템적인 접근을 요구하고 있다. EN 50126에 설명되어 있는 철도차량 설계단계에서의 RAM 활동 요구사항에 대한 정보의 흐름은 <그림 1>과 같다. 이 흐름 도는 철도차량 구매 계약이 체결된 후 적용되어야 할 RAM 프로그램에 반드시 포함되어야 할 대부분의 업무들을 보여준다. 이 가운데 특별히, 신뢰성 성장관리와 관련된 RAM 성장 모니터링을 위한 주된 활동 요구사항은 다음과 같다[5].

- *RAM Growth monitoring* - 이 업무의 목적은 가장 빠른 시간 내에 정상적인 서비스 수준에 도달할 수 있도록 RAM성장 (필수적으로 신뢰성장, *essentially reliability growth*)을 점검 및 관찰하는 것이다. (*Design Phase, page 52 of 72*)

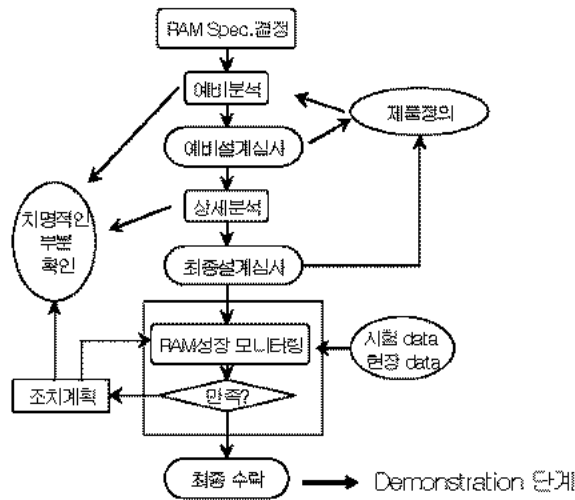


그림 1. 설계단계에서의 RAM활동 흐름[EN 50126]

2. 신뢰성 성장모델

신제품개발기간 동안 신뢰성성장을 일반적인 수식으로 처음 나타난 사람은 J. T. Duane[4]이다. Duane은 시험 데이터를 관찰한 결과 누적고장시간 대 누적고장수를 로그 그래프에 도식하였을 때 직선으로 나타나는 것을 발견하였다. 정의된 수식모델은

$$\log \rho_o(t) = \log \lambda - \alpha \log t \quad (1)$$

식 (1)의 양변에 로그를 제거하면, 식(1)은 식(2)와 같은 누적 고장률에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_o(t) = \lambda t^{-\alpha} \quad (2)$$

여기서 $\rho_o(t)$ = 시간 t 동안의 누적 고장률이며, λ = 상수, α = 성장률, t = 총 시험시간을 나타낸다.

식 (2)는 시스템에 대한 신뢰성을 향상시키기 위한 노력을 계속하는 한, 시간 t 가 증가함에 따라 누적 고장률은 감소하고, 신뢰성은 성장한다는 것을 의미한다. 성장기간 동안 고장시간은 지수분포를 하며 누적 MTBF는

$$M_o(t) = [\rho_o(t)]^{-1} = \frac{1}{\lambda} t^\alpha, \quad t > 0. \quad (3)$$

이 함수에서 $N(t)$ 를 시간 t 까지의 누적고장수라고 하면($t > 0$), 누적 고장률 $\rho_o(t)$ 는 $\rho_o(t) = N(t)/t$ 로 나타낼 수 있다. 따라서, 식(2)로부터, $N(t) = \lambda t^{1-\alpha}$ 이다. 시스템의 순간 고장률(Instantaneous failure rate) $\rho_i(t)$ 는 누적고장수 $N(t)$ 의 단위 시간 당 변화율을 나타낸다. 즉,

$$\rho_i(t) = dD(t)/dt = \lambda(1-\alpha)t^{-\alpha} \quad (4)$$

이다. 그러므로, 순간(Instantaneous) MTBF는

$$M_i(t) = \frac{1}{\lambda(1-\alpha)} t^\alpha, \quad t > 0 \quad (5)$$

이 된다. 식(3)과 식(6)에서, 순간 MTBF와 누적 MTBF의 관계는 식(6)과 같다.

$$M_i(t) = \frac{1}{(1-\alpha)} M_o(t) \quad (6)$$

Crow[1]는 Duane의 가정으로부터 NHPP(Non Homogeneous Poisson Process) 개념을 수식화에 추가하였으며, 순간 고장률 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\rho_i(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (7)$$

여기서 λ 는 척도모수(scale parameter), β 는 형상모수(shape parameter)이다. NHPP의 특성은 평균이 시간에 따라 변하는 것 외에는 모든 특성이 포아송 프로세스의 조건을 만족한다.

시간 간격 $[s, t]$, $t > s > 0$ 에서의 기대고장수를 $N(s, t)$ 라고 하면, 기대 고장수는

$$\begin{aligned} N(s, t) &= \int_s^t \rho_i(t) dt \\ &= \lambda t^{1-\alpha} - \lambda s^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

NHPP 가정 하에서는 시간간격 $[s, t]$ 에서 정확히 a 개의 고장이 발생할 확률은 평균 $N(s, t)$ 를 가진 포아송 분포를 한다. 즉, 모든 $N(s, t)$, $t \geq s \geq 0$ 에서

$$P_r \{X=a\} = \frac{[N(s, t)]^a e^{-N(s, t)}}{a!} \quad (9)$$

이다. 여기서 X 는 $[s, t]$ 에서의 고장수이다.

Crow의 수식은 미국방표준(MIL-HDBK-189, Reliability Growth Management)에 상세히 설명되어 있다. 일반적으로 ANSAA(Army Materiel Systems Analysis Activity)모델이라고 하며, 신뢰성성장 예측과 추적에 널리 적용되어 IEC 61014 (Programmes for reliability growth, 1989년 제정, 2003년 upgrade)와 US ANSI 국가 표준 모델로 사용되고 있다.

3. 데이터 분석

3.1 Prototype 시험데이터 분석

시험차량의 운행조건은 1일 평균주행 거리 400km 이상으로 4량을 편성단위로(Tc-M-M-Tc)하였

다. 표정속도는 최고시속 30km 이상으로 설정하고 전체 시스템 및 서브시스템의 신뢰성은 MDBF 기준에 따라 약 12 개월간 시험하였다. Prototype 단계는 시험라인과 상용라인에서 병행하여 실시하였으며, 파일럿 단계에서는 고객의 상업라인에서 시험을 진행하였다. Prototype 단계에서의 시험결과 <표 1>과 같은 데이터 값을 얻었다. 여기서, 신뢰성성장 모델의 모수 추정을 위해 최우 추정치를 이용한다[3]. α 와 λ 는 $n \geq 1$ 일 경우 $(0, T]$, $0 < x_1 < x_2 < \dots < T$ 에서 최우추정치는

$$\hat{\alpha} = 1 - n / \sum_{i=1}^n \log(T/x_i), \quad \hat{\lambda} = n/T^{1-\hat{\alpha}} \quad (10)$$

이다. 따라서, 데이터로부터, $\hat{\alpha} = 0.367$, $\hat{\lambda} = 0.509$ 와 같이 구할 수 있다. 성장률 $\alpha = 0.367$ 은 계획적인 신뢰성성장 프로그램에서 나타나는 성장률의 범위인 0.3-0.6 의 범위 내에 있다. 데이터 값으로부터 Prototype 단계시험 종료시간 138,800km에서의 순간고장률을 계산하면,

$$\rho_s(t) = \lambda(1 - \alpha)t^{-\alpha} = 0.0004146$$

이 된다.

<표 1> Prototype 시험 데이터

누적 거리 (km)	고장 수	누적 고장 수	누적 고장률	누적 MDBF
38,800	44	44	0.00113	881.81
58,800	7	51	0.00087	1152.94
78,800	10	61	0.00077	1291.80
98,800	6	67	0.00068	1474.62
118,800	20	87	0.00073	1365.51
138,800	12	99	0.00071	1402.02

<표 1>의 시험데이터 값을 누적 고장률 vs. 누적 거리에 대한 타점을 한 결과 <그림 2>와 같다. 그림으로부터 고장률이 감소하는 것이 신뢰성성장을 보여주는 것을 알 수 있다.

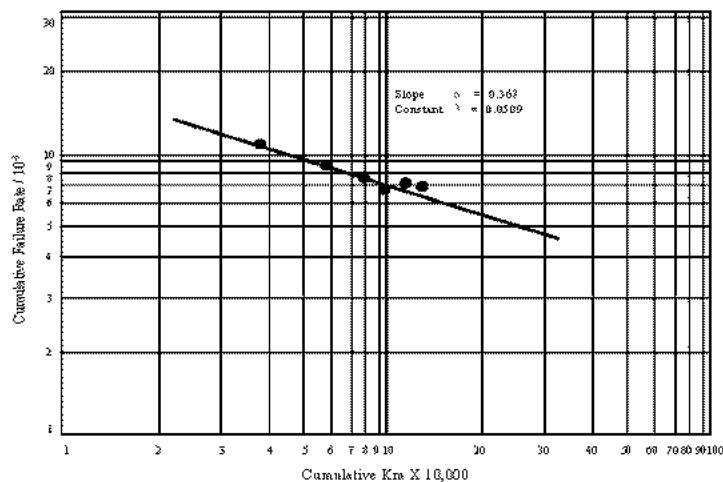


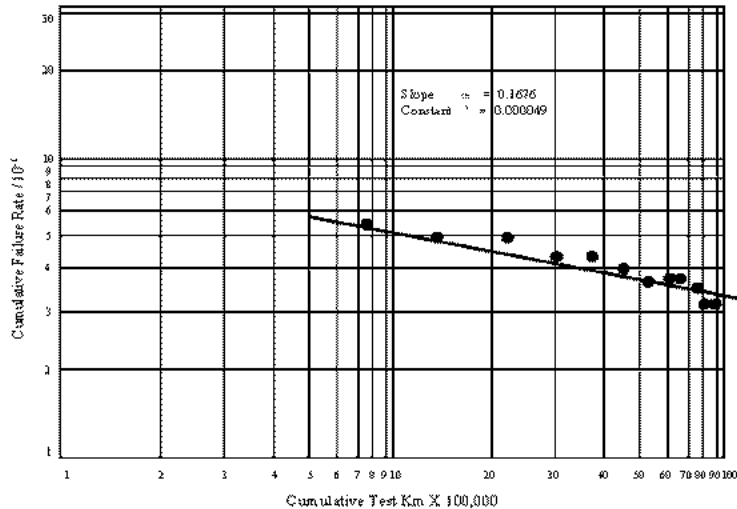
그림 2. Prototype 시험단계의 누적 고장률 vs. 누적 거리

3.2 Pilot 단계 시험데이터 분석

Pilot 단계의 데이터 값은 <표 2>와 같으며 식(3)으로부터 누적 MDBF는, $M_0(t) = 20,283.98t^{0.1676}$ 이고, Pilot 시험 종료단계인 9,000,000km에서의 MDBF는 $M_0(9,000,000) = 356,531.72 km$ 으로 예측할 수 있다. <그림 3>은 Pilot 단계의 누적 고장률을 누적 거리에 대비하여 로그-로그 용지에 나타낸 것으로 Pilot 단계에서의 성장률 $\alpha=0.1676$ 은 Prototype 단계의 성장률 $\alpha=0.367$ 과 비교하여 완만한 성장을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 Prototype 단계에서 많은 고장모드의 발견과 수정이 있었음을 알 수 있다. 여기서 Pilot 단계의 MDBF는 356,531.72km 로 최종 Prototype 단계의 MDBF 값 2,394.06km 에 비해 10배 이상 성장하였음을 알 수 있다.

<표 2> Pilot 단계 데이터 값

누적 거리 (km)	고장 수	누적 고장 수	누적 고장률	누적 MDBF
750,000	4	4	0.000053	187,500
1,500,000	2	6	0.000040	250,000
2,250,000	3	9	0.000040	250,000
3,000,000	4	13	0.000043	230,769
3,750,000	3	16	0.000043	234,375
4,500,000	2	18	0.000040	250,000
5,250,000	1	19	0.000036	276,316
6,000,000	3	22	0.000037	272,727
6,750,000	3	25	0.000037	270,000
7,500,000	1	26	0.000035	288,462
8,250,000	0	26	0.000032	317,308
9,000,000	3	29	0.000032	310,345



<그림 3> Pilot 단계의 누적 고장률 vs. 누적 거리

4. 적합도 검증과 고장 수 계산

다수의 시스템에서 NHPP(NonHomogeneous Poisson Process)모델의 적합성 평가에는 Cramer-von

Mises를 적용할 수 있다[1]. 이 적합도 검정은 개별 시스템의 시작 시간이 0이고, 고장이 $[0, t]$ 사이의 연속구간 내에 모두 일어나는 경우에 적절하다. Cramer-von Mises 검정만큼 강력하지는 않지만 χ^2 검정은 일반적인 상황에서 시작시간 값에 관계없이 적용할 수 있다. 그 밖에 지수분포의 적합도 검정에 활용되는 방법들은 적절한 변형으로 NHPP 프로세스의 검정에 활용할 수 있으며 다음과 같은 방법들이 있다.

- Anderson-Darling A^2 Test
- Watson's U^2 Test
- Kuiper's V Test
- Stephens's W^* Test
- Shapiro-Wilk W Test

고장 수에 대한 신뢰구간을 구하기 위해 시험시간 T 동안 n 개의 고장이 관찰되었을 때, $100(1-r)\%$ 양측 신뢰구간은

$$\alpha_U = 1 - \frac{(1-\hat{\alpha})\chi_{2n, 1-r/2}^2}{2n}, \quad \alpha_L = 1 - \frac{(1-\hat{\alpha})\chi_{2n, r/2}^2}{2n} \quad (11)$$

이다. 여기서 $H_0: a = a_0$ vs. $H_1: a = a_0$ 에 대한 검정을 위해서는 크기 $100(1-r)\%$ 신뢰수준으로 $\hat{a} < 1 - 2n(1 - \alpha_U) / \chi_{2n, 1-r/2}^2$ 또는 $\hat{a} > 1 - 2n(1 - \alpha_L) / \chi_{2n, r/2}^2$ 이면 귀무가설 H_0 는 기각된다.

5. 결론

본 논문에서는 철도차량의 개발에 있어서 신뢰성목표를 달성하기 위한 신뢰성 추적과 데이터 분석에 대한 신뢰성성장 이론의 실제적인 응용사례를 간략하게 보여주었다. 본 논문에 제시된 분석방법은 고장발견과 수정조치, 그리고 높은 수준의 신뢰성 설계사이의 관계를 성공적으로 입증하는데 적용될 수 있을 것이다. 사례에 나타난 분석 절차는 개발현장에서 활용할 수 있는 방법을 구체적으로 설명하고 있다. 최우추정치와 적합도 검정, 그리고 신뢰구간에 관한 내용은 간략하게만 기술하였다.

철도분야에 대한 RAMS 표준인 EN50126은 시스템의 신뢰성, 가용성, 보전성 및 안전성에 대하여 필수적인 활동사항을 규정하고 있다. 본 연구에서 제시한 신뢰성성장 모델의 실용적 적용방법은 RAM 목표를 달성하기 위하여 설계 및 개발단계에서 가장 중요한 활동 사항인 RAM 성장 모니터링에 적용할 수 있어 시험 데이터로부터 달성하여야 할 신뢰성 목표에 대하여 성장률, 그리고 달성 가능한 신뢰성 수준을 예측 평가하는데 효과적으로 활용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] 정원. Practical application of reliability growth in automotive new product cycle, IE Interface 산업공학, 제158호, 1999
- [2] Crow, Larry, New international standard on reliability growth, *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1991
- [3] Crow, Larry, An Extended reliability growth model for managing and assessing corrective action, *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2004
- [4] Duane, James, Learning curve approach to reliability monitoring, *IEEE Transactions on Aerospace*, Vol. 2. 1964
- [5] EN50126, *Railway applications - The Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*, CENELEC, 1999