

RAM 성장모니터링을 위한 실용적인 신뢰성 성장관리

Practical Reliability Growth Management for RAM Growth Monitoring

Won Jung*

ABSTRACT

The purpose of this research is to present a practical method for efficiently monitoring a reliability growth process using AMSAA(Army Materiel Systems Analysis Activity) reliability growth model. The presented method is viable for identifying failure modes, incorporating design changes and monitoring reliability progress on an on-going basis during the early stages of a product development program.

According to the Application Guide for EN 50126(RAM part for Rolling Stock), reliability growth monitoring is essential part of the main tasks of design phase in RAM growth monitoring. Implementation of reliability growth management program will provide very useful information on concept selection, product/process reliability, and cost effectiveness without too much time, money and engineering effort being spent on the development of failure suspect parts.

1. 서론

최근 RAMS(Reliability Availability Maintainability and Safety) 요구사항에 대한 국제적인 수준이 점점 높아가고 있어 이에 대한 적극적인 대응이 필요하다. CENELEC(유럽전자기술표준화 위원회)의 EN50126과 이를 근간으로 한 IEC 62278 Railway Applications 등은 시스템 수명 사이클을 통해 RAMS를 위한 시스템적인 접근을 요구하고 있다. Application Guide for EN 50126[5]에 의하면, RAMS 프로그램에 포함되어야 할 주요한 업무내용 중 RAM 성장 모니터링에 대하여 다음과 같이 기술하고 있다(RAM Growth monitoring in Design Phase, p.52).

RAM Growth monitoring: 이 업무의 목적은 차량이 가장 빠른 시간 내에 정상적인 서비스 수준에 도달할 수 있도록 RAM성장 (**필수적으로 신뢰성성장**, essentially reliability growth)을 점검 및 관찰하는 것이다. 이 업무는 주 계약자와 모든 협력업체가 참가해야 하며 다음내용을 위한 문제해결 과정이다.

- 차량의 초기 운용단계에서 일어 날 수 있는 문제(결함)를 확인한다
- 계약상 요구되는 차량 성능에 가장 영향을 주는 주된 문제들을 부각시킨다
- 문제를 완전히 해결하거나 그 영향을 감소시키기 위한 조치계획을 상세히 설명한다
- 조치사항에 대한 단계별 프로세스를 진행 또는 중단할 것인가를 결정하기 위해 조치계획의 영향을 검토 확인한다.

* 대구대학교 산업시스템공학과 교수, 정회원

신뢰성성장 추적(Reliability growth monitoring)은 시스템의 개발기간동안 신뢰성의 변화를 추적하여 목표하는 신뢰성 수준을 달성하기 위해 충분한 비율로 성장하고 있는지의 여부를 가능한 빠른 시간 내에 판단할 수 있게 해준다. 시스템 개발책임자는 신뢰성추적을 위한 시험데이터로부터 현재 시스템의 신뢰성 상태, 성장률의 평가, 앞으로 기대되는 달성 가능한 수준을 결정하여 필요한 자원을 적절히 배분하게 되는데 개발기간동안의 이러한 프로그램을 신뢰성성장관리(Reliability growth management)라고 한다.

신뢰성 성장관리 기술은 시스템을 개발하는데 소요되는 많은 시간과 비용 및 엔지니어링 노력을 절감하면서 개념선택, 제품과 공정의 신뢰성, 그리고 비용효율을 달성할 수 있도록 유용한 정보를 제공해 준다. 군사장비, 자동차 및 전자, 중장비 개발 등에 적용된 최근의 신뢰성 성장관리 기술은 각 분야의 경쟁적인 사업 환경아래에서 제품개발을 효율적으로 조직하여 신뢰성평가를 시작하고, 신뢰성 성장 과정을 추적할 수 있도록 해준다.

본 연구의 목적은 AMSAA(Army Materiel Systems Analysis Activity) 모델을 실용적으로 활용할 수 있는 방법을 제시하는데 있다. AMSAA 모델은 IEC 국제표준과 US ANSI 국가표준 및 국방핸드북에 포함되어 있으며[3, 4], 개발단계에서 엔지니어링 개선조치의 정도에 따른 신뢰성 수준의 변화를 모델링하는데 많이 활용되어 왔다. 본 연구에서는 AMSAA 모델을 개발한 Crow[4]가 제시한 고장모드의 구분방법과 각 고장모드에 대한 개선효율 평가방법을 쉽게 활용할 수 있는 방법을 보여준다.

2. 신뢰성 성장시험 프로세스

신뢰성 성장은 개발시스템에 대하여 여러 시험단계가 시리즈로 이루어지는 동안 고장모드를 발견하고 이를 개선하는 TAAF(test analyze and fix)과정을 거쳐 이루어진다. 또한, 기능시험, 환경시험, 안전시험의 결과는 신뢰성향상을 위한 FMEA 또는 FRACAS 등과 연계하여 사용된다. 분석 결과는 설계변경에 반영되고 최종목표가 달성될 때 까지 개선과 시험이 연속적으로 이루어진다.

<그림1>은 일반적인 신뢰성 성장시험 프로세스를 보여준다. 프로그램의 시작시점에 신뢰성 성장에 대한 계획을 수립하여 고객의 기대사항을 만족시킬 수 있는 성능 수준에 대한 구체적인 측정치를 제시하고, 이 목적을 달성시킬 수 있는 시험조건을 정한다. 시험조건은 특정한 부품이나 시스템에 대하여 고객의 사용방법과 환경에 대한 지식을 기초로 하여야 한다.

시스템의 개발과정에 적용되는 신뢰성 성장관리 프로세스는 다음과 같다.

- (1)신뢰성 성장 작동시험환경을 결정하고, 왕복시험 사이클을 개발한다.
- (2)신뢰성 성장곡선의 사용을 통하여 시험과정을 실행하고 추적한다.
- (3)시험결과를 평가하고 다른 선행된 분석연구결과들과 비교한다.
- (4)확인된 결함을 제거하기 위해 설계변경을 실시한다.
- (5)설계검증시험을 준비한다.

신뢰성 성장시험의 주된 목적은 설계상의 약점을 확인하고 제거함으로써 설계의 신뢰성을 증가시키는 것이다. 정확하게 진행상황을 추적하기 위해서는 요구사항에 대한 불합치성(Nonconformance)을 확인하고 불합치성이 일어난 시간을 모두 추적하여야 한다. 시험을 시작하기 전에 적절한 시정조치를 용이하게 하기위해 사전계획이 수립되어야 하며 고장분포를 결정하기 전에 각각의 고장부품에 대한 고장원인을 분리할 수 있어야 한다. 지수고장분포의 경우에는 Duane 모델이나 AMSAA모델이 다른 제품보증수단들과 함께 가장 널리 활용되는 신뢰성 성장관리 모델이다.

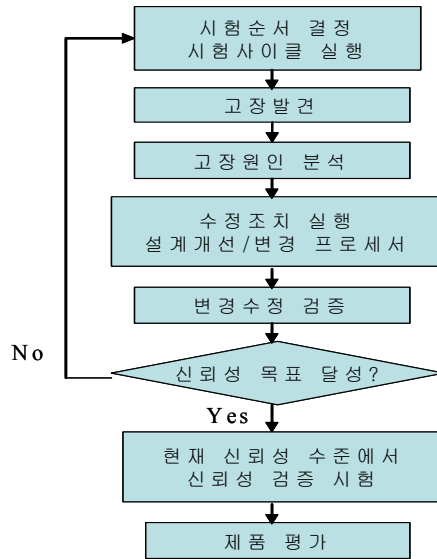


그림 1. 신뢰성 성장시험 프로세스

3. 신뢰성 성장모델

신뢰성 성장을 일반적인 수식으로 나타낸 사람은 J. T. Duane[2]이다. Duane은 시험 데이터를 관찰한 결과 누적고장시간 대 누적고장수를 로그-로그 그래프에 타점하였을 때 직선으로 나타나는 것을 발견하였다. 정의된 수학모델은 다음과 같다.

$$H(t) = \lambda t^{-\alpha} \quad (1)$$

여기서, $H(t)$ =시간 t 에서의 누적고장률, λ =상수, α =성장률, t =전체시험시간이다. 이 모델에서 고장시간은 지수분포를 따른다. $N(t)$ 를 시험시간 t ($t > 0$)까지의 누적고장 수라고 했을 때, 시간 t 에서의 관측된 누적고장률은 $H(t) = N(t)/t$ 와 같다. 따라서, 누적고장 수는 식(1)로부터 $N(t) = \lambda t^{1-\alpha}$ 라고 할 수 있다.

Crow는 다양한 통계적 분석을 위해 Duane의 가정으로부터 순간 고장률 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$h(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (2)$$

여기서 λ 는 척도모수(scale parameter), β 는 형상모수(shape parameter)이다.

Crow 모델은 일반적으로 AMSAA 모델이라고 하며, 신뢰성 성장 예측과 추적에 널리 적용되어 IEC 국제표준과 US ANSI 국가 표준 모델로 사용되고 있다.

Crow[4]는 고장모드를 A 모드와 B 모드로 구분하였다. A 모드는 시험 중에 발견되더라도 개선 조치가 적용되지 않는 고장모드이다. 이는 경영자가 경제적, 기술적 혹은 다른 이유로 인하여 개선조치를 하지 않는 것이 좋다고 판단하는 고장모드이다. B 모드는 시험 중에 발견되는 대로 설계개선을 포함한 개선조치가 취해지는 고장모드이다.

시험시간 T_1 인 1단계 시험에서 총 $M \leq K$ 개의 서로 다른 B고장모드가 발견되었을 때, $t = T_1$ 에서의 시스템 고장률 $\rho(t) = \rho(T_1)$ 를 다음과 같다.

$$\rho(T_1) = \lambda_A + \sum_{j=1}^M (1-d_j)\lambda_j + (\lambda_B - \sum_{j=1}^M \lambda_j) \quad (3)$$

여기서 d_j 는 j 번 째 발견된 서로 다른 B고장모드의 개선효율(fix effectiveness)이며 엔지니어링 판단에 따라 결정된다. 이 결과를 시스템 수준으로 확대하면, 시간 $t = T_1$ 에서의 시스템고장률에 대한 기대 값은 다음과 같다.

$$E[\rho(T_1)] = \lambda_A + \sum_{i=1}^K (1-d_i)\lambda_i + \sum_{i=1}^K d_i \lambda_i e^{-\lambda_i T_1} \quad (4)$$

4. AMSAA모델 활용을 위한 두 가지 제안

AMSAA 모델을 여러 가지 시험환경에서 실용적으로 활용하기 위해서는 다음의 두 가지 사항에 대한 제약사항이 있을 수 있으며 이에 대한 활용 방안을 제시하면 다음과 같다.

(1) 개선효율의 적용

시험기간 중 B 모드가 발견되었을 때, 개선을 위해 상당한 시간이 필요한 경우에 그 때마다 시험을 중단할 수는 없으므로 시험의 진행과 동시에 개선활동이 이루어질 때 현재의 신뢰성 수준을 예측하는 것이 필요하다. 이러한 상황에서 해당 고장모드에 대하여 개선될 수준을 합리적으로 예측하고 이를 신뢰성평가에 개선크레딧으로 적용할 수 있다면 개발과정을 정상적으로 관리하는데 매우 도움이 될 것이다. 개선크레딧의 기준은 엔지니어링 경험을 바탕으로 한 고장 원인확인, FMEA해석 및 설계검증의 정도에 따라 결정하여야 한다. 즉, 개선크레딧은 고장모드에 대하여 개선조치를 한 후에 예상되는 신뢰성수준을 나타내는 예측치이다. 아래 <표 1>은 개선크레딧에 대한 가이드라인이며 제품의 종류와 특성에 따라 조정될 수 있다.

표 1. 개선크레딧의 예

개선 크레딧	개선조치 및 결과	
0.9	<ul style="list-style-type: none"> 발견된 고장의 근본적인 원인 확인됨 개선조치가 이루어짐 충분한 비교측정 및 시험데이터로 증명됨 	<ul style="list-style-type: none"> 모든 FMEA 고장모드 해석이 이루어짐 성공적으로 검증(Demonstration)이 된 제품
0.8	<ul style="list-style-type: none"> 발견된 고장의 근본적인 원인 확인됨 충분한 비교측정 및 시험데이터로 증명됨 	<ul style="list-style-type: none"> 개선조치가 이루어짐 모든 FMEA 고장모드 해석이 이루어짐
0.6	<ul style="list-style-type: none"> 발견된 고장의 근본적인 원인 확인됨 개선조치가 이루어짐 	<ul style="list-style-type: none"> 제한된 비교측정 및 시험데이터 목표수준 달성에 대한 Demonstration이 충분하지 않음
0.2	<ul style="list-style-type: none"> 근본적인 원인 미확인 설계변경이 이루어짐 	<ul style="list-style-type: none"> 제한된 비교측정 및 시험데이터 목표수준 달성에 대한 Demonstration이 충분하지 않음
0.0	<ul style="list-style-type: none"> A 형태의 불량모드 개선조치가 적용되지 않음 	

(2) 고장모드의 구분

자동차, 중장비와 같은 일반 상용제품의 개발에 있어서는 대부분 과거모델을 기본으로 개선해 나가는 진화적 개발 프로세스(evolutionary process) 형태이므로 신뢰성 성장시험 시 발견된 고장모드에 대해 전혀 개선조치를 취하지 않는 A고장모드의 개념을 사용하는 예가 드물다. 국내 설계개발업체의 대부분은 개발단계의 신뢰성 성장시험 기간동안 A 고장모드의 개념을 적용하지 않고 있으며, 따라서 모든 고장모드에 대해 설계변경을 포함한 최대한의 개선조치를 취한다는 가정 하에 신뢰성평가를 하였다. 따라서, 식(4)는 실용화를 위해 A 고장모드의 개념을 제거하고 <표1>의 개선크레딧을 적용하여 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$E[\rho(T_1)] = \sum_{j=1}^M (1 - C_j) \frac{N_j}{T_1} + \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M C_j \hat{\lambda} \hat{\beta} T_1^{\beta-1} \quad (5)$$

여기서 C_j 는 개선크레딧으로서 Crow가 제안한 평가 모델에서의 개선효율(fix effectiveness), d_j 의 개념과 구분된다.

$$\hat{h}(t) = \hat{\lambda} \hat{\beta} t^{\beta-1} = \hat{\beta} \frac{M}{T_1} \quad (6)$$

이다.

5. 데이터분석 예제

140,000km의 주행시험 동안 차량의 주요 부분(EMU, Gear system between cars, Brake system, Traction power and control system, Auxiliary power supply and control system, ATP system, Protection and dispatching radio system)에 대한 고장 수와 개선크레딧을 반영한 고장 수 데이터를 <표 2>에 나타내었다.

시험결과 데이터로부터 고장 수는 102개이므로, 모수 β , λ 는 최우추정치로부터 $\beta = 0.4080$, 상수 $\lambda = 0.1272$ 로 계산할 수 있다. 또한, 시스템의 순간고장률 $h(T_1)$ 은 식(6)으로부터 $h(T_1) = 5.2457E-05$ 로 된다.

따라서, 1단계 시험이 끝나는 140,000km에서 시스템의 순간고장률은 식(5)로부터 $\rho(T_1) = 0.000197$ 이 되며, 이때 MTBF는 5,076km 로 평가된다.

6. 결 론

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.

본 연구에서는 제품개발기간동안의 고장발견과 시정조치, 그리고 신뢰성 목표 달성 사이의 관계를 보여주는 신뢰성 성장관리에 대하여 설명하였다. 주된 내용으로는 Test-Fix-Find-Test의 일반적인 성장시험상황에서 AMSAA 모델을 실용적으로 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 이러한 접근 방법은 신뢰성 성장관리에 대한 충분한 지식과 신제품개발에 관한 데이터베이스를 확보하고

있지 않은 대부분의 기업에서 시험단계 별 성장수준평가에 있어 중요한 요소인 개선효율에 대하여 개선크레딧의 개념을 도입하여 쉽게 활용할 수 있는 방안을 제시한 것이다. 더욱이, 군수장비의 개발에 도입된 A 고장모드의 개념을 수식에서 제거하여 상용제품의 개발현실에 맞도록 실용화 하였다.

표 2. 개선크레딧을 반영한 고장 수 데이터

고장 모드	고장시간 (km)	고장수	개선 크레딧	개선후 예상 고장수
1	1200, 1600, 2000, 3400, 12000, 18000, 20000, 23000, 28000, 34000, 62000, 104000	12	0.9	1.2
2	12800, 36400, 50400, 78000, 125000, 138000	6	0.6	2.4
3	8000, 9600, 9800, 12000, 16000, 17400, 18000, 26000, 33000, 42000, 59800, 74000	12	0.8	2.4
4	3800, 4000, 12000, 18000, 30000, 42000, 48000, 88000	8	0.9	0.8
5	19600, 37400, 39000, 102000, 106000, 109000, 114000, 118000, 128900, 139000	10	0.8	2.0
6	5400, 27200, 77400, 82000, 98000, 110000, 112000, 118000, 130000	9	0.8	1.8
7	24900, 28800, 32000, 122000	4	0.9	0.4
8	14600, 36000, 122000	3	0.8	0.6
9	2400, 18000, 32000, 104600	4	0.6	1.6
10	1900, 46000, 106000	3	0.9	0.3
11	39200, 100200	2	0.9	0.2
12	17200, 18800, 24000, 30000	4	0.8	0.8
13	100200, 102000, 108000	3	0.6	1.2
14	1200	1	0.9	0.1
15	82200, 94800, 99000, 123000, 134000	5	0.8	1.0
16	106000, 110000, 114000, 134000	4	0.6	1.6
17	102000, 118000, 118000, 128800	4	0.9	0.4
18	58000, 65200, 74300, 96500	4	0.2	3.2

참고문헌

- [1] Crow, L. H., An Extended Reliability Growth Model for Managing and Assessing Corrective Actions, *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp.171-180, 2004.
- [2] Duane, J. T., Learning Curve Approach to Reliability Monitoring, *IEEE Transactions on Aerospace*, Vol.2, pp.556-563, 1962.
- [3] IEC 61014, Ed.2: Programmes for reliability growth, 2003.
- [4] MIL-HDBK-189, Reliability Growth Management, 1981.
- [5] EN50126, *Railway applications - The Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*, CENELEC, 1999