

신제품 개발단계에서의 신뢰성 성장 평가

Evaluating Reliability Growth in the New Product Development Stage

정 원
대구대학교 산업시스템공학과

Abstract

신뢰성성장시험관리는 제품개발프로그램의 초기단계에서 고장모드를 확인하고, 이를 개선 또는 제거하기 위해 설계를 변경하고, 그 결과 진행되는 신뢰성이 향상되는 변화를 추적할 수 있는 실용적인 방법이다. 본 연구의 목적은 AMSAA(Army Materiel Systems Analysis Activity)모델을 이용하여 신뢰성 성장을 계획하고 평가할 수 있는 실용적인 방법을 제시하는데 있다. 시험-개선 과정을 통하여 성장하는 신뢰성 수준의 변화에 대한 추적과 예측 가이드라인을 제시함으로써 현장에서 활용할 수 있는 방법을 보여준다.

1. 서론

신뢰성성장시험관리(Reliability growth test management) 기술은 제품을 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 신뢰성성장시험관리 기술은 각 분야의 경쟁적인 사업 환경아래에서 제품개발을 효율적으로 조직하여 신뢰성평가를 시작하고, 신뢰성성장 과정을 추적할 수 있도록 해준다. 본 논문에 설명된 분석 기술은 제품 및 공정설계 관련사항 및 검증시험 항목들에 대하여 사용환경에 따른 신뢰성성장 진행과정을 확인하고, 그 결과로부터 성장시험곡선을 개발할 수 있게 한다. 또한, 설계단계사이의 여러 가지 관련성을 확인하여 관찰하고, 그 정보를 다른 제품보증분석들과 연결하여 고객요구사항에 대한 제품의 적합도를 적절히 평가하는데 도움을 준다.

개발프로젝트가 진행되는 동안 신뢰성 성장시험이 개발되고 실행되고 분석되는 과정에서 설계 및 공정의 관심사항을 확인하기 위해 QFD, FMEA 등 제품보증을 위한 분석방법들이 선행되어 실시되는데 신뢰성성장관리와 연계하여 이를 통틀어 통합신뢰성성장시험관리(Integrated reliability growth test management)라고 한다. 신뢰성성장시험관리를 포함한 제품설계평가의 모든 과정은 제품/공정 신뢰성 향상에 있어 중요한 역할을 하는 제품보증기능의 한부분이다.

본 연구의 목적은 개발시험기간 동안 발견된 고장모드에 대하여 제품의 설계 개선이나 시정조치(corrective action)가 즉시, 혹은 지연되어 이루어지는 경우에도 적용할 수 있는 실용적인 신뢰성 평가 방법을 제시하는데 있다. 한 시험단계에서 다른 시험단계로 전개될 때 시스템의 신뢰성 수준이 향상되는 정도는 엔지니어링 개선조치의 정도에 따라 다르다. 본 연구에서는 AMSAA 모델을 활용하여 설계 개선 및 시정조치 후의 시스템의 신뢰성 수준 예측에 대한 가이드라인을 제시함으로써 개발단계에서 신뢰성 성장을 평가하고 추적할 수 있는 방법을 보여준다.

2. 신뢰성성장시험관리 프로세스

제품보증을 위한 신뢰성평가기술(QFD, FTA, FMEA, 수명예측, 수명비용분석)은 제품의 개발에 있어서 여러 가지 신뢰성 질문에 답해줄 수 있는 각각의 특별한 잇 점을 가지고 있다. 이와 함께 신뢰성성장시험관리 프로세스는 설계 뿐 아니라 공정신뢰성과 관련된 많은 질문에 대답해 줄 수 있도록 신뢰성성장시험의 잇 점을 전적으로 활용할 수 있는 수단을 제공한다.

신뢰성성장시험관리 과정을 개발함으로써 신뢰성 수준은 계속적으로 추적될 수 있고, 조치를 취하고 다른 분석결과들과 비교되어 초기신뢰성예측을 수립하고, 제품설계에 포함된 확신을 증가시킨 후 검증시험에 들어갈 수 있도록 한다. 이러한 신뢰성성장관리 프로세스는 제품개발 사이클에 있어서 초기 단계 동안에 신뢰성을 확립하는데 도움을 줄 수 있는 미케니즘이다.

제품개발과정에 적용되는 신뢰성성장시험관리 프로세스는 다음과 같다.

1. 신뢰성성장 작동시험환경을 결정하고, 왕복시험 사이클을 개발한다.
2. 신뢰성성장시험곡선의 사용을 통하여 시험과정을 실행하고 추적한다.
3. 시험결과를 평가하고 다른 선행된 분석연구결과들과 비교한다.
4. 확인된 결함을 제거하기 위해 설계변경을 실시한다.
5. 설계검증시험을 준비한다.

신뢰성성장 시험의 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 하기 위해 사전계획이 수립되어야 하며 고장분포를 결정하기 전에 각각의 고장부품에 대한 고장원인을 분리할 수 있어야 한다. 지수고장분포의 경우에는 Duane 모델이나 AMSAA 모델이 다른 제품보증수단들과 함께 가장 널리 활용되는 신뢰성성장관리 모델이다.

3. 신뢰성성장 모델

신뢰성성장을 일반적인 수식으로 나타낸 사람은 J. T. Duane[5]이다. Duane은 시험 데이터를 관찰한 결과 누적고장시간 대 누적고장수를 로그-로그 그래프에 타점하였을 때 직선으로 나타나는 것을 발견하였다. 정의된 수학모델은 다음과 같다.

$$\log H(t) = \log \lambda - \alpha \log t$$

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

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.

시스템의 순간고장률, $h(t)$ 는 $N(t)$ 의 단위시간당 변화율로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = dN(t)/dt = \lambda(1-\alpha)t^{-\alpha} \quad (2)$$

Crow[1]는 Duane의 가정에 NHPP(Non Homogeneous Poisson Process)개념을 신뢰성성장 모

델에 추가하여 수식 화하였다. NHPP의 특성은 분포의 평균이 시간에 따라 변하는 것 외에는 모든 특성이 포아송 프로세스의 조건을 만족한다. NHPP는 성장하는 시스템을 모델링하는데 폭넓게 사용되어왔다[4].

NHPP 가정하에서 시간 간격 $[s, t]$, $t \geq s \geq 0$ 에서의 기대고장 수, $N(s, t)$ 는

$$N(s, t) = \int_s^t h(t) dt = \lambda t^{1-\alpha} - \lambda s^{1-\alpha} \quad (3)$$

이다.

Crow[1]는 다양한 통계적 분석을 위해 Duane의 가정으로부터 식(2)에 나타난 순간 고장률 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$h(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (4)$$

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

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

Crow[2]는 고장모드를 A 모드와 B 모드로 구분하였다. A 모드는 시험 중에 발견되더라도 개선조치가 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. A 고장모드와 B 고장모드는 각각의 고장률과 MTBF를 가지고 있다. 여기서 고려하여야 할 사항은 개선조치가 이루어질 대상인 B 고장모드 중 일부가 발견되지 않을 수도 있으며, 또한 발견되더라도 완전무결(100%)하게 즉석에서 개선조치가 이루어지는 것은 아니라는 것이다. 또한, 설계개선이 이루어진 후에도 고장률의 일부가 제거되지 않고 남아있는 경우도 있다. 만약 설계 개선이 다음 시험단계가 시작되기 직전까지 모두 이루어진다면 시스템의 신뢰성수준이 한 단계 상승할 것이며(jump), 상승의 정도는 엔지니어링의 개선효율(fix effectiveness)에 달려있다.

시험프로그램 중 고장모드의 발생이 독립적인 지수분포를 따르고 A모드의 고장률이 λ_A , B모드의 고장률이 λ_B 이면, 초기시험시작단계의 시스템 고장률 $\rho(t)$ 는

$$\rho(0) = \lambda_A + \lambda_B \quad (5)$$

이다. 만약 시스템에 전체 K 개의 B모드를 포함하고 있다고 할 때, B고장모드의 고장률은 $\lambda_B = \sum_{i=1}^K \lambda_i$ 로 표시되며 이 때 λ_i 는 i 번 째 고장률이다.

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

$$\rho(T_1) = \lambda_A + \sum_{j=1}^M (1-d_j)\lambda_j + (\lambda_B - \sum_{j=1}^M \lambda_j) \quad (6)$$

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 시스템 고장률에 대한 기대 값은 다음과 같다.

$$E[\rho(T_1)] = \lambda_A + \sum_{i=1}^K (1-d_i)\lambda_i + \sum_{i=1}^K d_i \lambda_i e^{-\lambda_i T_1} \quad (7)$$

식(7)의 첫 번째 항목 λ_A 는 시험시간 T_1 까지 발견된 A 고장모드의 고장수로부터 계산하고, 두 번째 항목에 대한 계산은 설계개선이 이루어졌을 때 개선효율을 반영한 후 잔존 고장에 대한 B 고장모드의 고장률로부터 계산된다. 세 번째 항목의 우변은 시간 T_1 에서의 순간고장률, $\hat{h}(T_1)$,을 나타내며, AMSAA모델의 순간고장률을 적용한다. 그러면, 식(7)은

$$E[\rho(T_1)] = \frac{N_A}{T_1} + \sum_{i=1}^M (1-d_i) \frac{N_i}{T_1} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d_i \lambda_i \beta T_1^{\beta-1} \quad (8)$$

이 된다.

4. AMSAA모델 활용을 위한 두 가지 제안

AMSAA 모델을 개발한 Crow는 최근 AMSAA 모델을 여러 가지 시험환경에서 활용할 수 있는 방안을 제시하였다[3]. 그러나, 그의 제안을 일반적인 상용제품의 개발프로그램에 활용하는데 있어서는 다음과 같은 두 가지의 어려움이 예상되며 그에 따른 활용 방안을 제시하면 다음과 같다.

첫 째로 각 고장모드에 대하여 어느 정도의 개선효율을 적용하는가의 문제이다.

개선결과의 효율성을 평가할 수 있는 능력을 가진다는 것은 개발자가 신뢰성 성장 프로그램을 계획하고 관리할 수 있는 능력을 확실히 가질 수 있다는 것이다. 그러나, 실제적으로는 개선조치 전후의 효율성에 대하여 통계적인 신뢰수준을 가지고 합리적으로 평가할 수 있는 충분한 고장데이터가 없는 경우가 대부분이다. 결과적으로, 정보의 부족과 데이터베이스의 부족은 비현실적인 개선효율요소를 고려하는 결과가 있을 수 있어서, 과도하게 낙관적이거나 비관적으로 되어 시스템의 신뢰성 수준에 대한 평가를 바르게 하지 못한다. 각 고장모드에 대한 개선효율을 잘 평가하기 위해서는 각 시험단계 별로 다량의 데이터를 확보하는 것이 중요하다. 개선조치 전후에 고장모드에 대한 상당히 많은 양의 데이터를 가질 수 있다면, 각 고장모드 별 효율성은 직접적으로 평가될 수 있다. 그러나, 실제시험에서 많은 양의 시험시간이나 시험데이터를 확보하기가 어렵다.

Crow[2]는 개선효율을 추정하기 위한 방법을 제시하였다. 이는 한 시험단계가 끝난 후에 개선결과 나타난 신뢰성 수준을 가지고 역으로 평가하는 것이어서 시험기간 중에 목표 대비 현재의 신뢰성수준을 계획(projection)하는 데는 활용하기가 힘들다. 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 설계검증(demonstration)의 정도에 따라 결정하여야 한다. 즉, 개선크레딧은 고장모드에 대하여 개선조치를 한 후에 예상되는 신뢰성수준을 나타내는 예측치이다. 만약, i 번째 고장모드의 개선크레딧(고장 감소율)을 C_i 라고 할 때, 발견된 고장모드에 대하여 $C_i \times 100$ 퍼센트의 고장률을 제거하고 $(1 - C_i) \times 100$ 퍼센트는 제품에 남게 되는데 C_i 를 예상되는 개선크레딧으로 신뢰성평가에 미리 반영한다는 것이다. 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

둘째로 시험 중에 발견되더라도 경제적, 기술적 이유로 인하여 개선조치가 적용되지 않는 A 고장모드와 시험 중에 발견되는 대로 설계개선을 포함한 개선조치가 시작되는 B 고장모드의 구분이다. 이는 군사무기와 같이 고도의 신기술을 적용한 제품인 경우에는 그러한 가정이 필요하리라 생각된다. 그러나, 자동차, 중장비와 같은 일반 상용제품의 개발에 있어서는 대부분 과거모델을 기본으로 개선해 나가는 진화적 개발 프로세스(evolutionary process) 형태이므로 신뢰성성장시험 시 발견된 고장모드에 대해 전혀 개선조치를 취하지 않는 A고장모드의 개념을 사용하는 예가 드물다. 실제로 Crow의 확대된 신뢰성성장모델에 대한 제안[3]에 포함되어 있는 예제를 살펴보면(<표 2>), 400시간의 시험시간 중에 A고장모드가 10개 발견되어 고장률은

$\lambda_A = N_A/T = 10/400 = 0.025$ 이다. Crow의 가정에 의하면, 이 A고장모드는 개선조치가

이루어지지 않고 그대로 고객에게 전달될 것이며 고객의 사용 환경에서 매 400시간마다 평균 10개의 고장을 일으키게 되어 있어 제품으로서의 기능을 다하지 못할 것이다.

대부분의 경우 신뢰성 성장시험 기간동안 발견되는 모든 고장모드에 대해 설계변경을 포함한 최대한의 개선조치를 취하며, 또한 그러한 가정 하에 신뢰성평가를 하고 있다.

따라서, 식(7)은 실용적인 활용을 위해 A 고장모드의 고장률을 제거하고 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$E[\rho(T_1)] = \sum_{i=1}^M (1-C_i) \frac{N_i}{T_1} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_i \lambda \beta T_1^{\beta-1} \quad (9)$$

여기서 C_i 는 개선크레딧으로서 Crow가 제안한 평가 모델에서의 개선효율(fix effectiveness), d_i 의 개념과 구분된다. C_i 는 <표1>의 가이드라인을 시스템의 상황에 맞게 적용하여 신뢰성 성장을 예측하는데 활용할 수 있다.

모수의 추정은 최우추정치에 의해 구할 수 있고[1], 순간고장률, $\hat{h}(T_1)$ 의 계산은

$$\hat{h}(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} = \beta \frac{M}{T_1} \quad (10)$$

으로부터 구해진다.

<표 2> Crow[3]의 Test-find-test 데이터

j	X _j	Mode	j	X _j	Mode
1	15	B1	22	260.1	B1
2	25.3	B2	23	263.5	B8
3	47.5	B3	24	273.1	A
4	54	B4	25	274.7	B6
5	56.4	B5	26	285	B13
6	63.6	A	27	304	B9
7	72.2	B5	28	315.4	B4
8	99.6	B6	29	317.1	A
9	100.3	B7	30	320.6	A
10	102.5	A	31	324.5	B12
11	112	B8	32	324.9	B10
12	120.9	B2	33	342	B5
13	125.5	B9	34	350.2	B3
14	133.4	B10	35	364.6	B10
15	164.7	B9	36	364.9	A
16	177.4	B10	37	366.3	B2
17	192.7	B11	38	373	B8
18	213	A	39	379.4	B14
19	244.8	A	40	389	B15
20	249	B12	41	394.9	A
21	250.8	A	42	395.2	B16

5. 데이터분석 예제

7대의 시작용 자동차에 대하여 각각 20,000 Km의 주행시험을 행하였다. 자동차의 주요 부분 (powertrain, shassy, body, electrical, climate)에 대한 시험결과 데이터를 이용한 분석 결과는 다음과 같다.

총 시험시간 $T_1=140,000$ 시간이며, 시험결과 데이터로 부터 고장수는 102개이었다. 모수 β, λ 는 최우추정치[1]로 부터 $\beta = 0.4080$, 상수 $\lambda = 0.1272$ 로 계산할 수 있다. 또한, 시스템의 순간고장률 $h(T_1)$ 은 식(10)으로부터 $h(T_1)=5.2457E-05$ 로 된다.

1단계 시험이 끝나는 시간인 $T_1=140,000$ 에서 시스템의 평균 고장률은 식(10)으로부터 $\rho(T_1) = 0.000197$ 이 된다.

<표 3> 개선효율을 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

<표 4> 시험거리에 따른 누적 고장률 데이터

누적시험거리 (Km)	누적고장수	누적고장률
40000	46	0.001150
60000	52	0.000867
80000	60	0.000750
100000	66	0.000660
120000	87	0.000725
140000	98	0.000700

6. 결 론

신뢰성성장시험은 예측한 고장모드의 정확성과 각 고장모드와 관련된 고장수의 분포, 그리고, 개발사이클의 초기에 수행된 최고스트레스에서의 신뢰성 예측, FMEA, FTA 등에 의해 제공된 전체 신뢰성평가에 대한 세부사항들을 분석할 수 있는 방법을 제공해 준다.

본 연구에서는 Test-Fix-Find-Test의 일반적 성장시험상황에서 AMSAA 모델을 실용적으로 활용할 수 있는 신뢰성성장시험관리 방안을 제시하였다. 만약, 더 많은 시험시간과 더욱 빈번한 추적과 고장분석으로 고장모드에 대한 추가 데이터가 확보될 수 있으면, 이를 활용하여 3모수 와이블 곡선에 의한 초기 제품신뢰성평가 시 설계신뢰성에 대한 수준을 더욱 잘 평가할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Crow, L. H.(1984), Methods For Assessing Reliability Growth Potential, *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 484-489.
- [2] Crow, L. H.(1989), Reliability Fix Effectiveness Factor Estimation, *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 171-180.
- [3] Crow, L. H.(2004), An Extended Reliability Growth Model for Managing and Assessing Corrective Actions, *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 171-180.
- [4] John Bieda(1991), Reliability Growth
- [4] Jung, W.(1999), Practical Application of Reliability Growth in Automotive New Product Cycle, *IE Interfaces*, 12(1), 158-165
- [5] Duane, J. T.(1962), Learning Curve Approach to Reliability Monitoring, *IEEE Transactions on Aerospace*, 2, 63-556.