신뢰성응용연구
제5권, 제3호. pp.381-391, 2005

연구논문

신뢰성 성장 개발단계에서 지연수정과 개발시험비용을 고려한 신뢰성 성장관리

김준홍* · 정원**

*수원대학교 산업정보공학과 · **대구대학교 산업정보시스템공학과

Reliability growth management for the delayed fixes and development cost in the reliability growth development phase

JunHong Kim* Won Jung**

*Department of Industrial Engineering, University of Suwon
**Department of Industrial System Engineering, Daegu University.

Abstract

The level of reliability attained largely depends upon the investment in reliability growth programs during development phase. In order to find the relationship between reliability growth test time and BRTE(basic reliability tasks effectiveness) in a reliability improvement program that minimizes LCC in which contains the reliability growth cost, repair and replacement costs, and spare parts ordering costs in service with given service rate in management policy, the growth rate has been suggested proper LCC versus growth rate. This model employs the reliability growth projection with delayed fixes in avionic equipment based on AMSAA.

1. 서론

신뢰성 성장시험은 복잡한 시스템을 개발하는 동안 계속적인 시험단계에서 제품 고장모드를 찾아내고 이를 개선하는 TAAF(test analysis and fix) 과정을 거쳐 이루어진다. 예를 들면 제품의 기능적, 환경적, 또는 안전성에 대한 시험결과는 신뢰성 개선을 위한 FRACAS (failure reporting and correct action system) 등과 연계하여 사용된다. 시스템의 신뢰성 수준의 향상 정도는 엔지니어링 팀이 시험 기간 동안 발견한 고장모드에 대해 어떻게 문제를 적절히 확인하고 개선하느냐에 따라 다르다.

신뢰성 성장 프로그램의 한 시험 단계에서 다른 시험 단계로 전개될 때 고장발생의 수정 시점에 따라 세 종류의 수정프로그램이 사용되고, 개발시험 결과에 따라 시스템의 신뢰도 수준이 도약(jump)하는 것은 엔지니어링 개선 조치 사항에 대한 효율성의 정도에 따라 다르다. 대부분 개발시험에서 고장의 원인이 발견되더라도 이를 개선하는데 시간이 걸리므로 특별한 고장모드를 제외하고 시험단계 후 설계개선이 이루어진다. 따라서 실제적인 개발환경에서 기술 및 비용 등을 고려하여 완전 수정, 불완전 수정, 수정지연, 수정 없음과 같은 수정 조치 상황이 발생할 수 있다[4]. 이러한 수정행위는 경영적인 의사결정이다. 따라서 신뢰성 성장 개발 프로세스 동안은 비용과 위험 간의 절충에 대한 의사결정의 연속이라 할 수 있다. 장치의 불충분한 신뢰성 성장 개발로 인한 재정적 비용은 결국 제품 LCC의 비용을 증가시키게 된다. 오늘날 신뢰성 성장연구는 주로 시험데이터에서 고장률을 추정하기 위한 모델을 개발하는데 초점을 두었으며 그 모델은 신뢰도를 개선하기 위한 차선의 의사결정을 지원하는데 이용되어 왔다.

시스템 개발에 있어서 달성된 신뢰도 수준이 낮은 현상은 자주 발생한다. 시스템이 설계되어 사용된 후 낮은 신뢰도가 제기하는 문제는 신뢰도를 개선하는데 드는 비용이 시스템 개발에 드는 비용보다 더 크다는 것이다. 제품이 복잡하거나 새로운 기술이 도입된 제품의 개발 일수록 높은 신뢰도를 달성하기 위해 많은 비용이 수반된다. 그러나 고장모드를 제거시점이 제품 life cycle에서 더 빠를수록 불신뢰로 인한 비용은 더 저렴할 것이다. 그럼에도 불구하고 부적절한 초기 신뢰도 프로그램이 발생되는 경우가 자주 있다. 여기에는 몇 가지 이유가 있다. 즉, 예측하지 못한 기술적인 문제, 촉박한 개발 일정, 제약된 사업비용, 운영비용을 부담으로 낮은 개발비용을 강조하는 프로그램 관리자의 짧은 재임기간, 이로 인한 결과는 더 높은 LCC 뿐 만 아니라 더 낮은 시스템 준비성으로 귀결된다. 신뢰성 투자의 결과로 총 비용을 언급하기 보다 생산비용과 같은 개별 비용 요소에 초점을 두는 연구들이 많이 있다[9].

이 논문에서 신뢰도 성장 프로그램에 있어서 목표 신뢰도를 달성하기 위해 투입된 개발비용에 대해 달성된 목표 신뢰도를 갖는 제품이 시장에서 고객이 사용 시 제품 고장에 따른 수리 및 교체 비용, 고객 서비스 수준을 고려한 예비품 보유를 위한 예비품 구입비용을 고려한 총비용과 신뢰성 성장에 따른 개발시험이 없는 경우 낮은 신뢰도를 갖는 제품에 의한 총비용 간의 손익분기점을 분석하여 적정 신뢰성 성장개발 시험시간을 설정하고 신뢰도 성장률과 LCC 간의 관계를 살펴본다.

2. 신뢰성 성장 개발 계획을 수립하기 위한 이론적 배경

2.1 연속적 신뢰성 성장 모델

신뢰성 성장은 보통 신뢰성 성장계획에 사용된 Duane model의 확률적 해석을 갖는 AMSAA model을 사용하여 투영, 추적된다. Duane은 누적 고장률 대 누적고장시간은 개발시험동안 수행된 신뢰성 성장 프로그램에 대해 log-log 그래프 상에서 직선으로 plot된다는 것을 밝혀내었고, learning curve growth pattern을 얻기 위해 누적 시험시간의 power function으로 고장률을 공식화하였다[5].

이 관측에 근거하여 Duane 은 시간 T 에서 현재의 순간고장밀도는

$$h(T) = \frac{d}{dt} E[N(T)] = \frac{1}{b}(1-\alpha) T^{-1} \qquad (1)$$

로 나타내었다. Duane 의 공식은 신뢰성 성장에 대한 예상 패턴을 제시하지만 데이터와 관련된 다양성을 지적하지 않는다는 점에서 deterministic 이라 말 할 수 있다. 식(1)에서 지수 α를 성장률이라 한다.

AMSAAA model[2]은 동일한 power function을 이용하지만 고장은 개발시험 단계 내에서 non-Homogeneous Poisson process(NHPP)로 발생한다고 가정하고 있고,

고장에 대한 현 확률적 모델이 평균치 함수

$$E[n(T)] = \lambda T^{\beta} \qquad (2)$$

와 intensity function

$$h(T) = \lambda \beta T^{\beta-1} \qquad (3)$$

를 갖는 NHPP 로 공식화 될 수 있다.

여기서 $\lambda = \eta^{\frac{1}{\beta}}$, $\alpha = 1-\beta$라 두면 식(1)과 (3)은 같다. 그러나 이들 모수는 데이터 분석시 어떻게 정의되는가에 따라 달라진다.

2.2 수정효율을 이용한 성장관리

개발시험단계 동안 고장모드가 발견되었을 때 발생된 고장모드를 모두 수정, 일부를 수정, 시험단계 후에 모두를 수정, 또는 전혀 수정하지 않는 방안이 있다. 이 중 시험단계 중 수정하는 방법은 비현실적이고, 따라서 설계엔지니어가 제안한 개선사항에 대해 개발자원, 기술적

내용, 과거 경험 등을 고려하여 개발책임자는 경제적, 기술적 혹은 다른 이유로 인하여 개선조치를 하지 않는 방안, 소위 A 모드고장과 시험 중 고장이 발견되면 설계개선을 포함한 개선조치가 수행되는 B 모드로 구분하여 관리하는 방법을 사용한다[4].

B 모드고장 중에는 일부가 발견되지 않을 수 있으며, 또한 발견되더라도 완전무결하게 바로 개선조치가 이루어지는 것은 아니고, 설계개선이 이루어진 후에도 고장률의 일부가 제거 되지 않고 남아 있는 경우도 있다. B 모드에 대한 수정활동을 통해 고장모드가 줄어들고 줄어든 효율을 수정효율(effectiveness factor)이라 하고 일반적으로 이 효율은 70%정도이다[4]. 따라서 수정효율은 경영자의 경영전략의 한부분이라 할 수 있다. 개발시험동안 발견된 B 모드의 고장에 대해 수정효율 d를 달성하면, (1−d)%는 제품에 고장으로 남게 된다.

지금 지연수정에 따른 B 모드고장이 K 개, λ_i ,(i=1,…,K), 는 i 번째 B 모드고장률이라 하자. 고장모드 발생이 독립적인 지수분포에 따르고 A 모드고장률이 λ_A, B 모드고장률이 λ_B 이면, 초기시험 시작단계에서 시스템 고장률은

$$\lambda(0)=\lambda_A+\lambda_B, \text{ 여기서 } \lambda_B=\sum_{i=1}^{K}\lambda_i. \tag{4}$$

지연수정이 이루어진 후 시각 t=T_1 에서의 고장률 r(t)=r(T_1) 은, 시험시간 [0,T1]동안 M≤K 개의 B 모드고장 수가 발생하므로,

$$r(T_1)=r_A+\sum_{i=1}^{K}(1-d_i)\lambda_i+(\lambda_B-\sum_{i=1}^{M}\lambda_i). \tag{5}$$

식(5)에서 각 아이템에 대한 B 모드고장에 대한 기대 수정효율로 정리하면,

$$\hat{r}(T_1) = \widehat{\lambda_A}+(1-d_1)\widehat{\lambda_B}+d_1\hat{h}(T_1). \tag{6}$$

여기서 $\widehat{\lambda_B}=\frac{N_B}{T_1}$,

$$h(T_1)=\hat{\lambda}\hat{\beta}T_1^{\hat{\beta}-1}=\hat{\beta}\frac{M}{T_1}, \text{ 여기서 } \hat{\lambda}=\frac{M}{T^{\hat{\beta}}}, \ \hat{\beta}=\frac{M}{\sum_{i+1}^{M}\ln(\frac{T_1}{X_i})}.$$

$$d_1=\frac{\sum_{i=1}^{M}d_{ij}}{M} \text{ 평균수정효율.}$$

식(6)으로 신뢰성 성장개발계획에서 개발시험시간을 수립하는데 이용될 수 있다.

2.3 기본신뢰성업무 효율성(BRTE)

신뢰성 성장 개발 계획을 추진하는데 있어 초기 신뢰도의 설정은 중요한 파라메터이다[3]. 이 값은 시스템에 대한 기본신뢰성업무 효율성(basic reliability tasks effectiveness, BRTE)을 근거로 설정된다. BRTE는 final MTBF θ_I에 대한 initial MTBFθ_0의 비율로서 기본신뢰성업무(basic reliability tasks, BRT)의 달성 정도를 나타낸다. 즉,

$$\text{기본신뢰성업무 효율성(BRTE)} = \frac{\theta_0}{\theta_I} \qquad (7)$$

기본신뢰성업무는 MIL-STD 785에 따르면 신뢰성 목표를 달성하기위한 업무는 ①프로그램 감시 및 관리, ②설계와 평가 ③개발과 생산 시험 업무로 이루어지는데 그 중 ①, ②는 전반적인 시제품을 만들기 이전에 근본적으로 수행되는 것으로 기본신뢰성업무(basic reliability tasks, BRT)후에 즉시 시제품의 MTBF가 완료되고 initial MTBF라 한다.

BRT 업무의 결과로 시제품을 이용하여 개발 및 성장시험(RDGT)업무가 수행된다. 이 업무 동안에 발견된 고장모드는 경영전략에 따라 수정행위를 하거나 (B 모드고장) 또는 수정행위를 하지 않거나 (A 모드고장)하는 수정활동을 하게 된다.

RDGT 시험이 충분하다면 system MTBF는 더 이상의 수정행위가 매우 드문 mature MTBF로 성장한다. 이 mature MTBF는 growth potential이다.

만약 시스템이 RDGT에 따른 다면 이 시험 종료 시 신뢰도는 final MTBF라 부른다. MTBF가 성숙되면 growth potential MTBF는 final MTBF와 같다.

따라서 이 비율의 값이 높다면, RDGT에서 기본신뢰성업무의 효율성이 낮음을 의미한다.

3. 개발시험 비용을 고려한 신뢰성 성장 관리

높은 신뢰도를 달성하기 위해 많은 비용이 든다. 특히 제품이 복잡하거나 비교적 해보지 않은 기술을 포함할 때는 더욱 그렇다. 개발 프로그램동안 목표신뢰성을 달성하기 위해 얼마의 비용을 지불할 수 있는가 하는 경영상의 한계가 보통 있게 마련이다.

이 논문에서 신뢰성 개발을 위해 신뢰성 성장 개발시험비용, 교체수리비용, 그리고 경영상 고객만족도를 기준으로 한 보유 예비품 구매비용 등을 고려하여 신뢰성성장 계획을 갖는 경우와 갖지 않은 경우의 비용들을 분석하여 경제적 개발시험시간과 BRTE 간의 적정관계를 제시한다.

3.1 개발단계에서 신뢰성 성장을 고려한 시험비용 C_{TD} 의 결정

신뢰성성장 개발단계에서 신뢰성 성장과 수정효율을 고려한 개발시험시간 t_D는 개발시험비용의 기초자료이다. 이를 위해 Duane model[5]에서 $\theta_C = \theta_0(\frac{t}{t_0})^{\alpha}$ 를 이용하고 $\theta_I = \frac{\theta_C}{1-\alpha}$ 의 관계를 적용하면

$$t_D = t_0(\frac{\theta_C}{\theta_o})^{\frac{1}{\alpha}} = t_0\left\{\frac{(1-\alpha)\theta_I}{\theta_o}\right\}^{\frac{1}{\alpha}} = t_0\left\{\frac{(1-\alpha)}{BRTE}\right\}^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

, 여기서 BRTE = $\frac{\theta_0}{\theta_I}$.

단위시간당 시험비용을 c_D라 하면,

$$\text{총 시험비용 } C_{TD} = c_D \cdot t_D \quad (9)$$

3.2 교체 수리비용 C_{TR} 의 결정

개발 제품의 출하 후 고객 사용기간 중 교체 수리비용은 기간 당 기대 고장 수에 좌우된다. 제품 고장 시 구간 (0,t]에서 기대 고장 수는 제조자가 보증비용(cost of a warrant)를 계산할 때 상당히 유용하고, 최적 예방보전 일정계획(optimal preventive maintenance schedule) 결정 시, 또 신뢰성 합격시험 기준(a criterion for reliability acceptance tests)으로 사용된다. 주어진 보증정책에 대한 보증비용을 결정하고 수리시스템에 대해 최적 보전교체기간을 구하는데 있어 기대 고장수의 역할은 상당히 중요하다.

지금, $m(t)$를 보증기간(warrant period) t 동안 기대 교체(재생)수라 하면,

$m(t)$=E[n(t)]

$$= \sum_{r=0}^{\infty} rP[n(t)=r] = \sum_{r=0}^{\infty} r[F_r(t) - F_{r+1}(t)] = \sum_{r=1}^{\infty} F_r(t) = F(t) + \sum_{r=1}^{\infty} F_{r+1}(t)$$

,여기서 $F_{r+1}(t)$는 $F_r(t)$과 F(t)와의 convolution이다.

모델의 단순화를 위해 제품 사용시 일정 고장률을 갖는 것으로 가정한다. 유니트의 고장시간분포의 pdf는 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$이고, 고장 시 동일 부품으로 교체된다. 따라서

$$m(t) = \mathrm{E}\{n(t)\} = \sum_{r=0}^{\infty} r\ \mathrm{P}\{n(t)=r\} = \sum_{r=1}^{\infty} \frac{\lambda^r e^{-\lambda}}{r!}$$

$$= (\lambda t)e^{-\lambda t}\sum_{r=1}^{\infty}\frac{(\lambda t)^{r-1}}{(r-1)!} = \lambda t \cdot e^{-\lambda t}\cdot e^{\lambda t} = \lambda t\ ,\ (t \geq 0)\ .$$

지금, $C_{TR}(t)$를 기대 보증비용(expected warrant cost)이라 하면,

$$C_{TR}(t) = c_R \cdot m(t) \qquad (10)$$

, 여기서 c_R 는 단위 교체당 비용

C_{TR1} : 개발 시험 전 총 교체작업비 $= m_1(t)c_R = \frac{n \cdot t_A \cdot t_{op}}{\theta_0} c_R = \lambda_0 t_T c_R$

C_{TR2} : 개발 시험 후 총 교체 작업비 $= m_2(t)c_R = \frac{n \cdot t_A \cdot t_{op}}{\theta_I} c_R = \lambda_I t_T c_R$

,여기서 $m_1(t)$: 개발시험 전 기대 고장수

t_T =n $t_A t_{op}$

n 서비스에 있는 제품 수

t_A 평가 대상 연수

t_{op} 연간 가동시간

3.3 경영적 고객 서비스율 P%에 대한 보유예비품 구입비용 C_{TS}의 결정

일정 고객 서비스율을 유지하기 위한 보유 예비품에 대해 우리는 이 모델에서 고객의 서비스는 분산형 서비스 형태로 분산된 서비스 지역에서 보증 수리 활동을 하고 있는 것으로 가정한다. 이 가정은 서비스 효율을 집중식보다 더 높일 수 있는 방법이다.

유니트에 대한 수명 교체는 일정기간 교체정책(constant interval replacement policy)하에 예방교체를 일정기간, 월별 또는 주별로 한다. 즉 유니트는 그 수명에 관계없이 사전에 정해진 시점에서 교체된다. 경영상 고객 서비스확률 P%를 유지하기 위한 아이템의 고장확률을 산출하고, 아이템의 개선된 MTBF에 대한 교체주기 동안 기대 교체수(고장수)는 보유 예비품 구입비용을 산출하기 위한 기초자료이다.

MTBF 동안 고장 난 평균 제품수가 서비스를 받을 확률 P%를 유지하기 위한 보유 예비품수 $m_G(t)$는 Poisson 분포에 따르고, 확률 $P\{X \leq x\} = P\%$가 되는 x의 값이다.

고객 서비스를 위해 가정하는 모델은 분산 서비스 시스템으로 다음과 같이 정의한다.

구역수 $g_N = \frac{n_S}{n_G}$, 여기서 n_S는 총 사용 아이템수, n_G는 지역당 사용 아이템수.

서비스 구역별 교체주기당 총 가동시간 $t_{OPR} = n_G \left(\frac{t_{OP}}{t_R}\right)$, 여기서 t_{OP}는 단위기간당 아이템의 평균사용시간, t_R는 제품 교체주기.

구역별 주기당 고장수 $m_G(t) = \lambda\, t_{OPR}$

예비품 총 구입비 $G_{TS} = c_P \cdot g_N \cdot m_G(t)$ (11)

, 여기서 c_P는 예비품 대당 구입비용.

4. 수치 예

항공기에 장착되는 cabin air-conditioning unit의 신뢰성성장개발 프로그램 사례를 중심으로 이 모델을 분석한다. 계획된 항공기 배치는 400대이고 각 비행기에 유니트 1대가 장착된다. 과거의 경험에 따르면 유니트의 고장률은 비행시간 1,000시간에 10대로 나타났고, 항공기의 연 평균 비행시간은 대당 350시간이다.

I단계 개발시험 1,500시간 결과 고장 아이템에 대해 수정효율을 갖는 delayed fixes를 수행하였다. 총 15대의 고장 중 A 모드고장은 3대, B 모드고장은 총 12대 중 9대는 서로 다른 고장 종류였다. 자료에 따르면 B 모드고장의 평균 수정효율 d_1=0.7이었다.

이 자료를 토대로 II단계 개발시험을 실시하여 새로운 유니트에 대해 목표 MTBF 250시간, 성장률 0.3을 목표로 reliability growth program을 계획하였다.

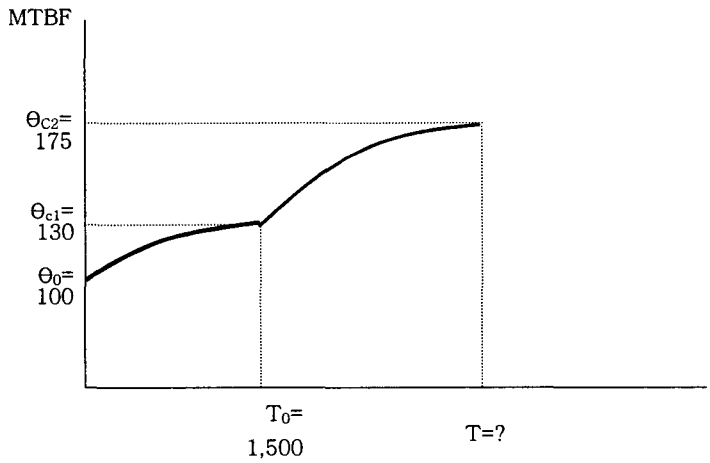
시험비용은 시간당 80원, 유니트 가격은 6,000원이고 유니트 교체 비용은 900원이다. 그리고 비용의 시간적 가치는 일정한 것으로 가정하고, 서비스에서 신뢰도 성장은 없으며, 아이템 고장은 단지 교체를 고려한다. 2년 작동 후 신뢰성 성장 프로그램에 대한 비용 효율성에 대해 분석한다. 여기서 비용단위는 원은 단위원을 사용하였다.

<표1 B 모드에 따른 고장시간>

B 모드	고장시간
1	26
2	36
3	212, 697
4	856, 1174
5	858
6	1120
7	1288, 1322
8	1343
9	1402

이 예에서 개발시험단계 I은 초기 MTBF 100시간으로 시작하였다. 단계 I동안 관측된 B모드고장에 대해 지연수정의 기술적 평가 및 미발견 B 모드고장의 출현비율에 대한 수정인수를 사용하여 각 고장에 대한 수정효율을 사용하였다. 이 모델에서 평균수정효율 0.7을 고려하였고, 결과로 성장률 0.22를 얻었다. 이 시험으로 달성된 MTBF는 167시간. 해당 BRTE=0.60이 었다.

단계 II는 이들 자료를 토대로 성장률 0.3으로 목표 MTBF 250시간을 달성하기 위한 개발시험을 진행한다. 이에 대한 총 시험시간을 4,006시간이고, BRTE는 0.52이 었다.



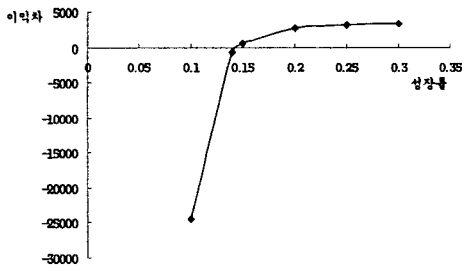
<그림 1> 신뢰성 성장 개발 프로그램

<표2> 개발시험 전, 후의 비용 비교표

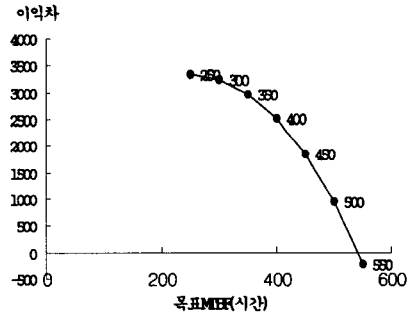
(단위:원)

		개발시험 전	개발시험 후
총 개발시험비			320,452
총 교체수리비		2,520,000	1,008,000
예비품 보유	연간 보유예비품수	16	7
	예비품 구입비	3,840,000	1,680,000
총비용		6,360,000	3,008,452

이 결과에 따르면 개발시험전과 후의 비용 차이는 3,351,548 (원)으로 개발시험에 따른 비용의 절감효과가 상당히 크다고 할 수 있다.



<그림 2> 성장률과 총비용 차의 관계



<그림 3> 목표 MTBF와 총비용 차의 관계

5. 결론

I단계 개발시험 결과를 토대로, 평균지연수정효율 70%, 성장률 30%를 고려하여 2단계 개발시험을 진행하여 얻은 결과는 총비용 부분에서 개발시험비용이 차지하는 비율이 약 10%이나, 개발시험이 없는 경우보다 약 2배 정도의 LCC에 서 이익을 제시하고 있다.

II단계의 BRTE가 1단계의 그것 보다 더 낮은 이유는 더 높은 성장률을 목표로 하여 2단계에서 수행한 결과이다. 약 0.3~0.4의 BRTE의 값은 적정수준으로 제시하고 있지만[3] 더 높은 지연수정을 고려한다면 목표 성장률에 따른 BRTE는 더 높아 질 수 있다.

이 사례 결과에서 성장률 0.13를 넘어서부터 LCC에서 이익효과를 얻어내지만, 그 이익효과는 성장률에 비례하는 것은 아니라 아주 작게 증가하는 모양을 보이고 있다. 이 결과는 아이템의 단위당 각종 비용에 성장률의 손익분기점에 변동이 있겠지만, 큰 틀은 변하지 않는 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] Brunner, F.J.," Application of Reliability Technology in Vehicles Development", Society of Automotive Engineers Symposium, 871956, 1987.

[2] Crow, L.H., "Reliability Analysis for Complex Repairable Systems in Reliability and Biometry", SIAM, pp.370-410, 1974

[3] Crow, L.H., "Studies and methods for improving the effectiveness of Reliability Tasks", IEEE, pp. 14-19, 2005.

[4] Crow, L.H., "Reliability growth projection from delayed fixes", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 84-89, 1983.

[5] Duane,J.T.," Learning Curve Approach to Reliability Monitoring", IEEE Transactions on Aerospace, 2, pp. 563-566, 1964.

[6] Gray,C.T., "A Modeling Framework for Reliability Growth", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 107-114, 1986.

[7] Jung. W., "Practical Application of Reliability Growth in Automotive New Product Cycle", IE Interfaces, Vol.12, No.1, pp. 158-165, 1999.

[8] MIL-HDBK-189, "Reliability Growth Management", Department of Defense Washington, DC, 1981.

[9] P.D.T. O'connor, "Practical reliability engineering 3rd", John wiley and sons, 1991.