

신뢰성 성장 프로그램

고정* · 이상규* · 권수호** · 노태성*** · 정원+ · 박창규++ · 김명수++

*두산인프라코어 · ** (주)SP · *** (주)AMS · +대구대학교 · ++수원대학교

Reliability Growth Program

J. Ko* · S.K. Lee* · S.H. Kwon** · T.S. Noh*** · W. Chung+ · C.G. Park++ · M.S. Kim++

*Doosan Infracore · **SP · ***AMS · +Daegu University · ++University of Suwon

1. 서론

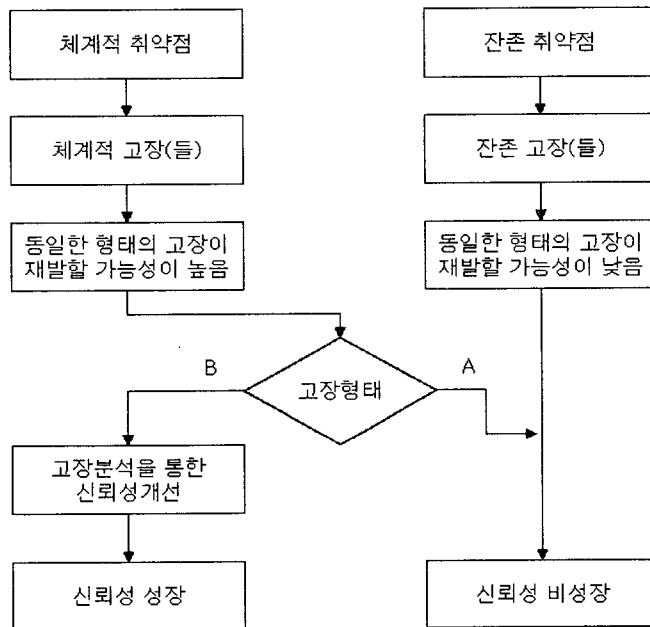
제품 개발기간 단축과 신뢰성에 대한 요구 증대로 인하여 설계 완료 후 또는 현장에서 발생한 문제를 개선하는 것은 제품 출시를 지연시키거나 많은 비용을 발생시킨다. 따라서, 개발단계에서 설정된 신뢰성 목표를 효과적으로 달성할 수 있도록 하기 위해 신뢰성시험을 통해 잠재 고장모드와 원인을 검증하고, 시험 중에 발견된 고장을 분석하여 신뢰성이 개선되는 과정을 모니터링 하는 것이 필요하다. 이를 신뢰성 성장(reliability growth) 프로그램이라 하며, 선진기업들은 이미 오래 전부터 개발기간 단축과 신뢰성 향상을 위하여 이 프로그램을 적용하여 왔다. 본 고에서는 신뢰성 성장 프로그램의 기본 개념과 자동차, 기계 등 하드웨어에 이를 적용하기 위한 절차와 방법을 소개한다.

2. 고장 형태와 신뢰성 성장

신뢰성 성장 프로그램에서는 고장을 <표 1>과 같이 잔존고장(형태 A)과 체계적 고장(형태 B)으로 분류한다. 제품의 신뢰성은 동일한 형태의 고장이 재발할 가능성이 크고, 기술, 비용, 시간 등의 제약조건 하에서 합리적으로 개선할 수 있는 체계적 고장의 원인을 제거함으로써 성장될 수 있다. 반면 동일한 형태의 고장이 재발할 가능성이 거의 없는 잔존고장은 신뢰성 성장의 대상이 아니다. [그림 1]은 고장 형태에 따른 신뢰성 성장을 나타낸 것이다.

<표 1> 신뢰성 성장 프로그램에서의 고장 분류

형 태	설 명
잔존 고장(A)	○ 안전과 관련이 없고, 설계변경에 많은 시간과 비용이 소요되는 고장
체계적 고장(B)	○ 안전과 관련된 고장 ○ 기술, 비용, 시간 등 제약조건 하에서 합리적으로 개선 가능한 고장

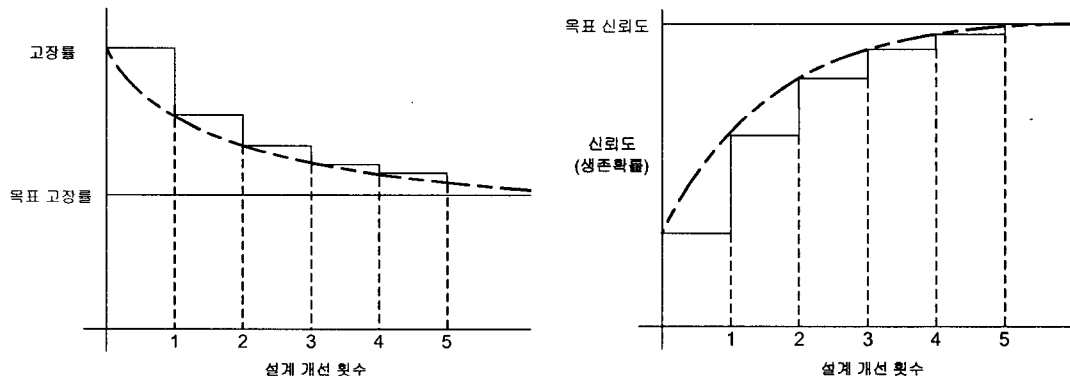


[그림 1] 고장 형태와 신뢰성 성장

3. 신뢰성 성장 모델

신뢰성 성장은 신뢰성시험을 통해 발견된 고장의 근본 원인을 제거함으로써 이루어진다. 제품의 신뢰성은 전체 수명주기에 걸쳐 성장될 수도 있지만 설계 단계에서의 활동이 가장 중요하다. 즉, 신뢰성 성장은 설계기간 동안 개선 횟수와 정도에 영향을 받으며, 일반적으로 [그림 2]의 (a)와 같이 나타난다. 개선이 이루어짐에 따라 고장률이 계단형으로 감소하는 근사적인 이차 곡선으로 표현될 수 있으며(이를 신뢰성 성장 모델이라 함), 따라서 신뢰성이 성장함에 따라 고장률이 감소하는 누승(power) 형태의 곡선으로 성장 모델을 가정한다. 한편, 자동차 또는 기계 산업에서는 보증기간 동안의 신뢰도(생존 확률)를 신뢰성 목표로 설정하며, 신뢰성 성장을 [그림 2]의 (b)와 같이 신뢰도 관점에서 표현할 수도 있다.

대표적인 신뢰성 성장 모델로는 Duane, AMSAA(Army Material Systems Analysis Activity) 모델이 있다. 또한, MIL-HDBK-189의 부속서에는 다양한 모델들이 제시되어 있다. 이 모델들은 5.2절의 신뢰도 성장곡선의 실적 신뢰도 성장을 추정하기 위해 사용될 수 있다.



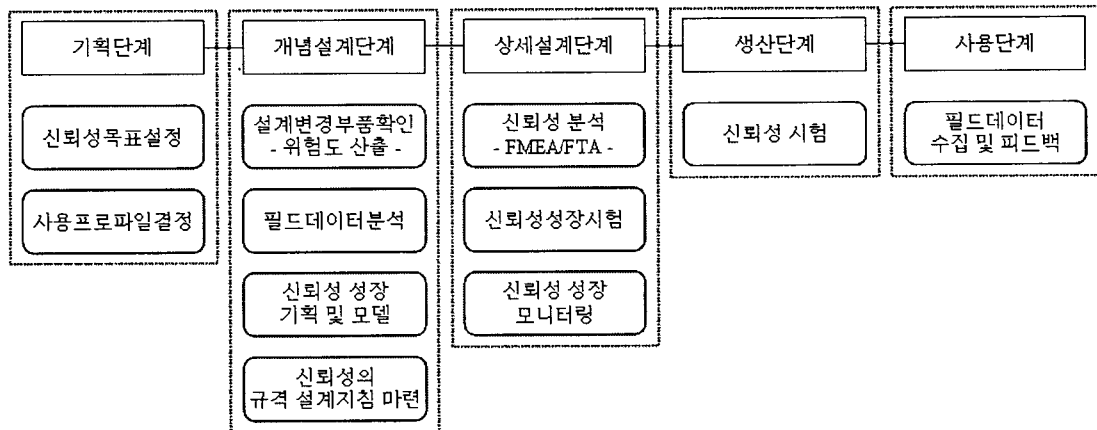
(a) 고장률 관점에서의 신뢰성 성장 모델 (b) 신뢰도 관점에서의 신뢰성 성장 모델

[그림 2] 신뢰성 성장 모델

4. 단계별 신뢰성 성장 프로그램

신뢰성 성장 프로그램은 전 개발 프로세스에 걸쳐 이루어진다. 따라서 경영자는 신뢰성 성장 프로그램을 계획·실행하기 위한 절차를 수립하고, 시험 및 개선 활동에 따른 업무협조 관계를 규정하여야 한다.

일반적으로 개념설계, 상세설계, 생산 등 개발 단계의 각 분기점(milestone)에서 승인(approval) 또는 의사결정이 이루어지며, 이때 경영자(또는 계약자)에게 신뢰성 성장 프로그램의 진행상황이 보고되어야 한다. 이 보고에는 신뢰성 분석, 시험 및 계획된 개선활동에 기초한 신뢰성 예측이 포함되어야 하며, 이로부터 신뢰성 목표와 예측 신뢰성 사이에 예상되는 차이를 조기에 파악할 수 있다. 만일 목표와 예측 신뢰성 사이에 차이가 많이 나면, 개발일정을 조정하거나 인력, 시료, 시험시간 등 추가 자원을 투입할 수 있다. 본 절에서는 개발 단계별 신뢰성 성장 프로그램을 소개한다. [그림 3]은 단계별 신뢰성 성장 프로그램을 나타낸 것이다.



[그림 3] 단계별 신뢰성 성장 프로그램

4.1 기획 단계

기획 단계에서는 개념적으로 제품을 정의하고 소비자의 요구사항 조사와 사용 프로파일 분석을 통하여 신제품의 신뢰성 목표를 설정한다. 이 단계에서의 신뢰성 성장 프로그램은 다음과 같다.

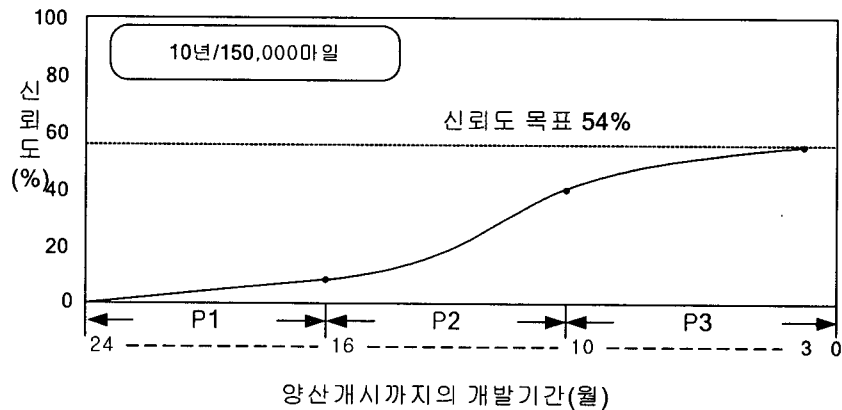
- ① 소비자의 요구를 조사하여 신뢰성 목표를 설정한다.
- ② 제품의 예상되는 사용·환경조건과 사용모드와 빈도 등을 고려하여 사용 프로파일을 결정한다. 이 프로파일은 신뢰성 예측, 시험 설계 등에 이용된다.

신뢰성 목표는 일반적으로 소비자의 요구에 의하여 결정된다. 철도, 항공기, 발전소, 무기체계 등과 같이 소비자의 요구가 계약서에 명시되어 있는 경우에는 개발단계에서 이를 만족시켜야 한다. 반면 민수용 제품(핸드폰, TV, 자동차 등)과 같이 소비자의 요구가 묵시적인 경우는 시장조사를 통해 신뢰성 목표를 설정할 필요가 있다. 이때 시장불량현황, 내용연수, 보증기간 및 비용, 기술수준, 신뢰성 성장 프로그램을 통해 달성할 수 있는 신뢰도에 기초하여 설정한다.

4.2 개념설계 단계

개념설계 단계에서는 제품을 상세히 정의하고 설계, 생산 및 마케팅에 대한 계획을 완료하며, 기능, 특징 및 기본 설계가 결정된다(이를 기본설계 또는 시스템 설계라고도 부른다). 이 단계에서의 신뢰성성장 프로그램은 다음과 같다.

- ① 기존 제품과 신제품을 비교하여 설계 변경된 부품을 확인하고, 변경 부품의 수와 정도를 고려하여 위험도를 산출한다. 이때, 부품은 조립품 또는 서브시스템이 될 수도 있다.
- ② 기존 제품의 필드 데이터를 분석하여 과거의 실패 사례를 신제품 설계에 반영하고, 개발 제품의 신뢰성을 예측한다.
- ③ 주요 설계 변경 부품과 신뢰도가 낮은 기존 부품을 선정하여 개선목표와 사전활동계획을 수립한다.
- ④ ①~③의 내용을 고려하여 신뢰성 목표를 확정하고, 계획 신뢰성성장 모델과 수행해야 할 업무들을 결정한다. 계획 신뢰성성장 모델은 신뢰성 목표와 기존 제품 개발 경험에 기초하여 설정할 수 있다. [그림 4]는 10년/150,000마일에서 신뢰도 54%를 자동차의 신뢰성 목표로 설정하고, 개발기간 중에 3단계에 걸쳐 신뢰성을 성장시키는 계획 신뢰성성장 모델을 도시한 것이다.
- ⑤ 신뢰성 목표는 제품 규격에, 신뢰성 규격은 설계 지침에 포함시킨다.



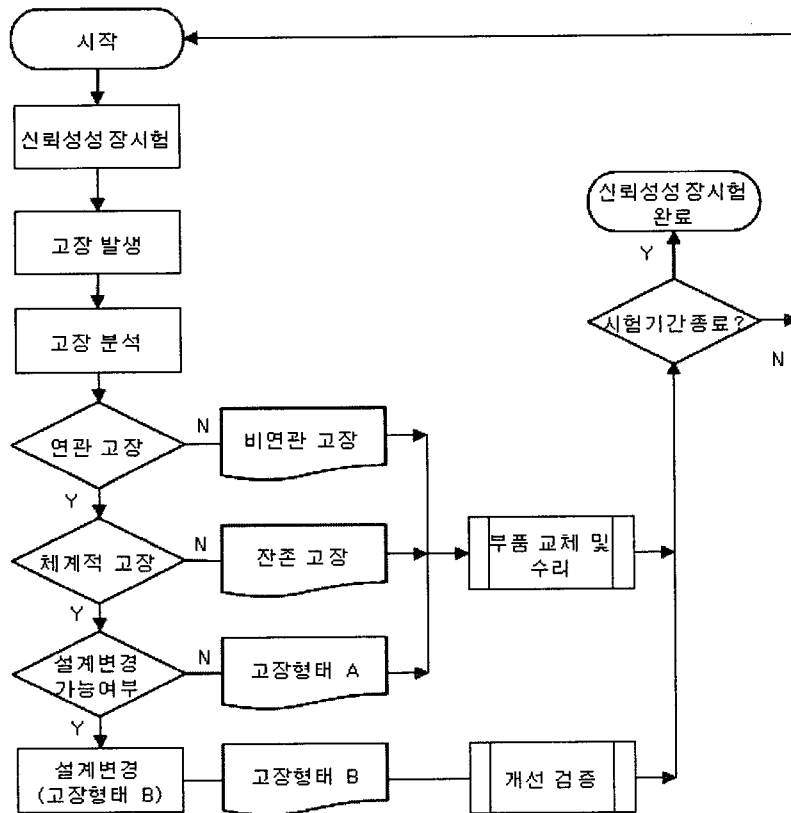
[그림 4] 신뢰성 목표와 계획 신뢰성성장 모델

일반적으로 개발과정에서 시스템의 신뢰성 목표를 서브시스템에 배분하여야 한다. 이때, 서브시스템에 배분된 신뢰성 요구조건을 명시하고, 예상되는 사용·환경과 최대 허용고장률(또는 B10 수명)을 규정하여야 한다. 또한, 유사 제품의 과거 이력 검토 또는 서브시스템의 신뢰도를 예측하여 설계 가능성을 검토하여야 한다. 한편, 산업의 특성과 사업모델(business model)에 따라 신뢰성 목표배분 및 예측과정을 적용하지 않는 경우도 있다.

4.3 상세설계 단계

상세설계 단계에서는 공학적 지식, 분석 및 평가에 기초하여 제품의 기능, 구조, 성능 및 구성품 등의 설계가 확정된다. 이 단계에서 신뢰성성장 프로그램은 다음과 같다.

- ① FMEA/FTA를 실시하고 위험우선순위(risk. priority number)가 높은 중요 부품에 대해 설계 및 공정 개선을 통하여 사전에 고장모드를 제거한다. 이때, 부품 또는 배치 변경, 부하경감(derating), 열 설계 등이 포함된다.
- ② 설계 및 공정개선을 통해 개선된 부품에 대한 신뢰성 성장 시험 계획을 수립하고 시험·평가를 실시한다. 시험 계획에는 대상(부품, 서브시스템, 제품), 장비(표준, 전용), 시험 조건, 기간 및 시료 수, 인력 등이 고려되어야 한다.
- ③ 시험 데이터를 수집·분석하여 시험품의 신뢰성을 추정(이를 실적 신뢰성이라 부르기로 한다)하고, 계획 신뢰성 성장 모델과 비교한다. 이 과정을 신뢰성 성장 모니터링이라고 하며, 이 내용은 4절에서 소개한다.
- ④ 시험·평가과정에서 고장이 발생하였거나 신뢰성 목표에 미달한 부품은 고장분석을 통해 원인을 제거하고, 개선된 부품은 검증시험을 통하여 개선여부를 확인한다. [그림 5]는 고장의 형태에 따른 성장 프로세스를 나타낸 것이다.
- ⑤ 신뢰성 목표를 달성할 때까지 ②~④의 과정을 반복하여 수행한다.



[그림 5] 고장의 형태와 신뢰성 성장

신뢰성 성장 시험은 제품의 사용 프로파일에 기초하여 계획되며, 최근에는 가속수명시험으로 수행하는 것이 일반적이다. 시간 또는 자원부족 등의 이유로 개선활동이 생략된다면 계획한 신뢰성 성장은 기대할 수 없다. 또한 기존 제품의 개선 효과가 적용기술, 인력 등의 차이로 인하여 신제품에서 동일하게 나타나지 않을 수도 있다. 제품의 초기 신뢰성 정보가 얻어지면 신뢰성 성장 모니터링을 시작할 수 있지만 정확한 모니터링은 통계적으로 유의한 개수의 고장이 관측되어야 가능하다.

4.4 생산 단계

생산 단계에서의 신뢰성성장 프로그램은 다음과 같다.

- ① 생산준비 단계에서는 시제품을 제작하고 양산성을 보증하기 위한 신뢰성 시험을 실시한다. 시험 중 고장이 발생하면 즉시 개선 조치를 취하여야 한다.
- ② 생산 단계에서는 설계 신뢰성을 제조과정에서도 만족하는지를 확인하는 시험을 실시할 수 있다. 신뢰성 성장 또는 설계검증 시험에서 나타나지 않았던 결함이 발견되면, 이를 시정하여야 한다.

생산 단계에서는 로트의 신뢰성을 보증하기 위한 샘플링시험, 제조결함이 있는 제품을 선별하기 위한 스크리닝(screening) 시험을 실시할 수 있다.

4.5 사용 단계

사용 단계에서는 제품의 필드 데이터를 수집·분석함으로써 운용 신뢰도(operational reliability)를 평가하고, 설계 변경의 영향을 확인할 수 있다. 필드 데이터는 제품 개선을 위한 정보를 피드백하며, 이를 후속 제품 개발에 반영할 수 있고 현 제품의 신뢰성을 성장시키는데 활용할 수도 있다.

필드에서 확인된 결함을 개선하고, 이를 리콜(recall) 등을 통하여 교환 또는 수리한다면 사용 단계에서 신뢰성 성장이 이루어졌다고 볼 수 있다. 한편, 통신교환기와 같은 제품은 일정 기간동안 필드에서 운용하고, 이 기간동안에 발생한 결함을 개선하는 것까지 계약에 포함되어 있다. 이 경우도 사용 단계에서 신뢰성 성장이 이루어진다고 볼 수 있다.

5. 신뢰성 성장 모니터링

신뢰성 성장 프로그램은 제품 개발 단계에서 설계, 시험, 분석 및 개선을 통하여 신뢰성 목표를 달성하는 과정이다. 이때, 계획된 목표와 실적 신뢰성을 비교평가하는 것을 신뢰성 성장 모니터링이라 하며, 이를 통해 특정 시점에서 개발 제품의 신뢰성 수준(reliability status)에

대한 정보를 수집할 수 있다. 신뢰성 성장 프로그램 및 모니터링은 대표적으로 자동차 산업에서 적용되지만 전기·전자, 기계 등의 다른 산업에서도 산업 또는 사업의 특성에 맞게 내용을 일부 변경하여 적용할 수 있다.

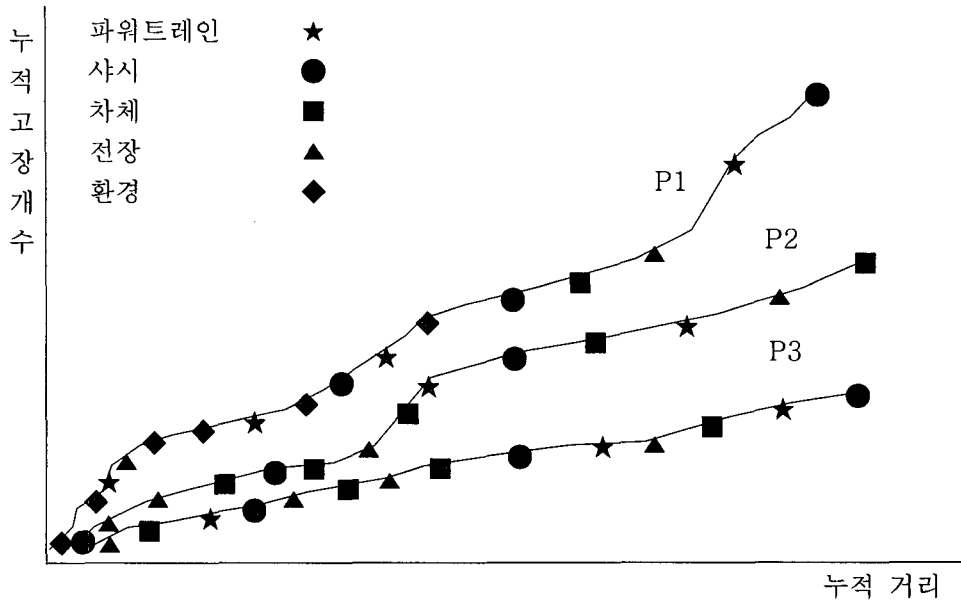
신뢰성 성장 모니터링은 제품의 수준(부품, 서브시스템 및 제품)과 가용한 데이터의 종류에 따라 다음 <표 2>와 같은 3가지 접근방법이 사용된다.

<표 2> 신뢰성 성장 모니터링의 접근방법

방 법	제품수준	데이터 형태	결 과
누적시간/고장 그래프	○ 제품 ○ 서브시스템	○ 시험 데이터	○ 프로토타입 간의 개선 표시
신뢰도 성장 곡선	○ 제품 ○ 서브시스템	○ 누적 시간 ○ 누적 고장 수	○ 신뢰도 목표, 계획 및 실적 신뢰도 표시
와이블 분석	○ 부품	○ 고장 시간	○ 와이블 확률용지와 신뢰성 척도 제시 ○ 개선 전·후의 비교

5.1 누적시간/고장 그래프

개발기간 중에 제품(또는 서브시스템) 프로토타입의 신뢰성 성장을 평가할 수 있는 가장 쉬운 방법은 시험 데이터로부터 수집된 누적 시간(또는 거리)과 누적 고장 개수를 그래프로 표현하는 것이다. 예를 들어, 자동차는 주행시험장(proving ground)에서 시험하여 고장이 발생할 때까지의 주행거리, 고장모드, 고장 개수 등을 기록한다. 누적시간/고장 그래프는 [그림 6]과 같이 누적시간(거리)을 X축, 누적고장개수를 Y축에 타점한 것이다. 이때, 프로토타입 1(이하 P1), 프로토타입 2(이하 P2), 프로토타입 3(이하 P3)은 각각 개념, 설계, 생산준비 단계의 프로토타입을 의미하며, 단계가 진행됨에 따라 누적 고장 개수가 감소하고 신뢰성이 개선됨을 알 수 있다. 시간의 단위로는 일반적으로 날짜, 운용기간, 거리, 사이클 등이 될 수 있다. 특히, 자동차 산업의 경우에는 거리(마일)가 시간의 단위로 사용된다.



[그림 6] 누적시간/고장 그래프의 예

5.2 신뢰도 성장곡선

신뢰도 성장곡선은 개발 기간동안 신뢰도가 개선되는 과정을 나타내는 그림이다. 제품의 신뢰도 목표, 성장계획, 실제 성장결과를 하나의 그래프에 표시함으로써, 계획 대비 실적을 평가하고 진행과정을 모니터링 할 수 있다. 이 곡선은 다음의 4가지 요소로 구성된다.

① 신뢰도 목표(reliability goal 또는 target)

신뢰성 성장 프로그램을 통해, 개발 기간 중에 달성하고자 하는 제품(또는 서브시스템)의 신뢰도 목표를 표시한다. [그림 7]은 10년/150,000마일에서 신뢰도 54%를 신뢰성 목표로 설정한 예를 보여주고 있다.

② 계획 신뢰도 성장곡선(planned reliability growth curve)

계획 신뢰도 성장곡선은 신뢰도 목표 달성을 위하여 단계별로 계획된 성장률을 나타낸다. 계획 성장률은 개발기간과 경험을 고려하여, 프로그램 초기단계에 결정한다.

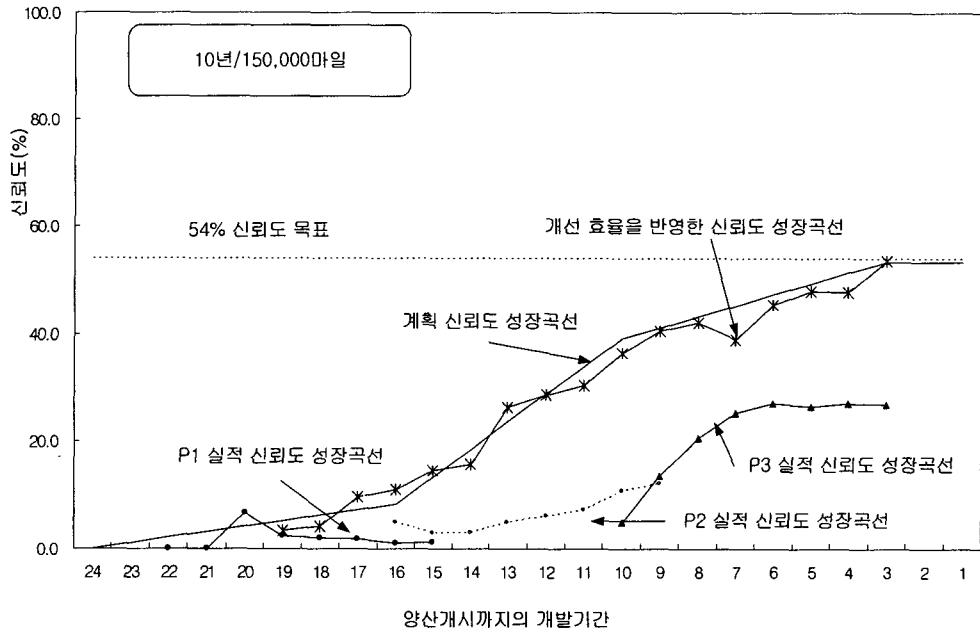
③ 실적 신뢰도 성장곡선(demonstrated reliability growth curve)

실적 신뢰도 성장곡선은 각 단계에서 신뢰성(성장)시험을 통해 수집된 데이터로부터 추정된 특정 시점에서의 신뢰도를 나타낸다. 이 곡선과 계획 신뢰도 성장곡선을 비교함으로써 계획 대비 실적을 평가할 수 있다.

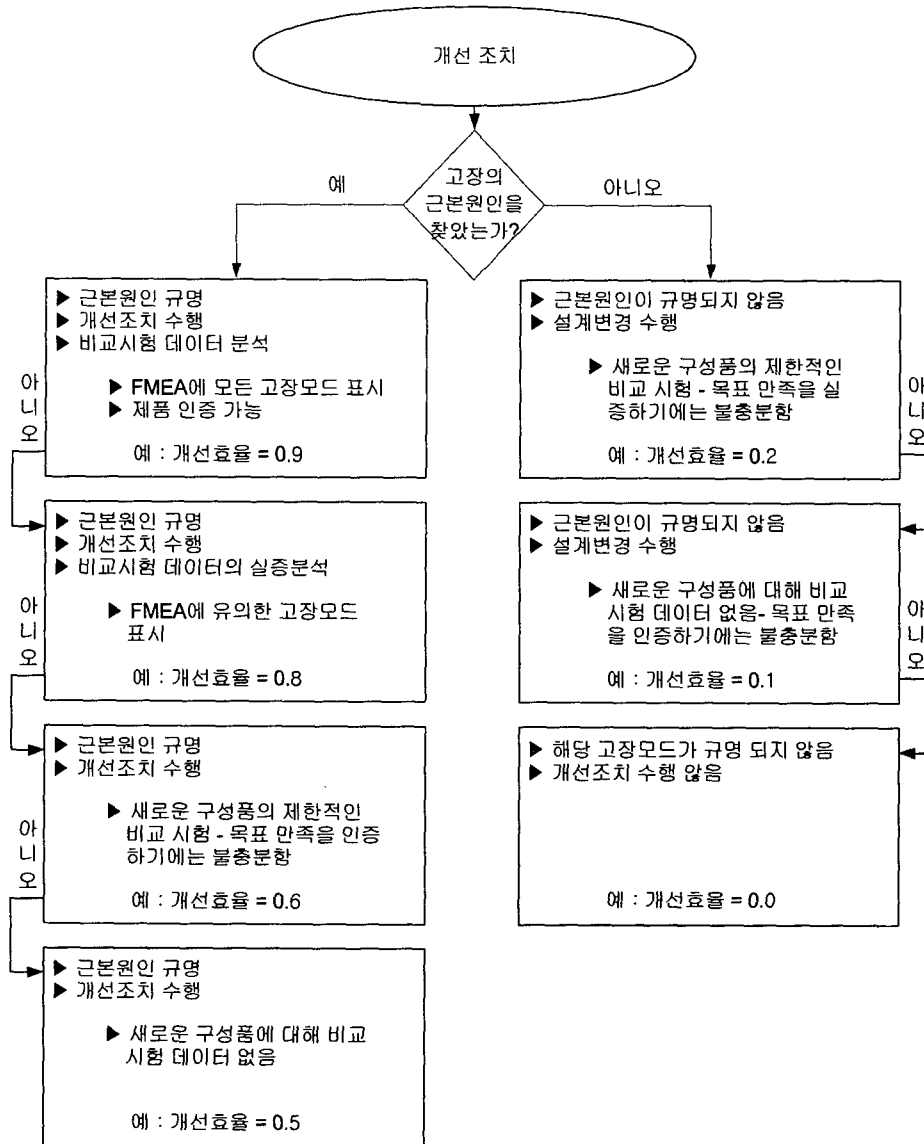
④ 개선효율을 반영한 신뢰도(reliability with design credit)

제품의 신뢰성은 고장의 근본원인(root cause)을 제거함으로써 개선될 수 있다. 그러나, 어떤 고장을 완벽하게 개선할 수는 없으며, 어느 정도 불확실성을 내포한다. 개선효율

(design credits)은 고장에 대한 개선 정도를 나타내며, 고장의 원인을 규명하고 개선할 수 있는 능력을 반영한 값이다. 한편, 각 단계에서 발생한 고장이 개선되면 제품의 실제 신뢰도는 ③의 실적 신뢰도와 달라진다. 개선효율을 반영한 신뢰도가 신뢰성 성장 프로그램을 통해 예상되는 결과이다. [그림 8]은 개선효율 결정 흐름도의 예이다.



[그림 7] 신뢰도 성장 곡선의 예

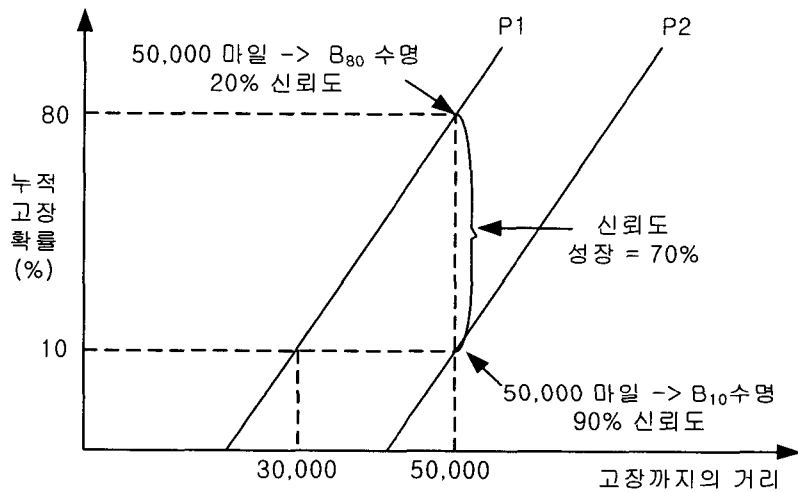


[그림 8] 개선효율 결정 흐름도의 예

5.3 와이블 분석

와이블 분포는 형상모수(β)와 척도모수(η)에 의해 결정되며 많은 부품의 수명 데이터에 적합한 분포로 알려져 있다. 와이블 분석은 와이블 확률용지를 이용한 데이터 분석으로서, 소수의 고장시간 데이터가 주어졌을 때, 신뢰성에 관한 많은 정보를 구할 수 있다. 와이블 분석을 통해 다음과 같은 정보를 얻을 수 있다.

- ① 특정 시점(거리, 사이클 등)에서의 신뢰도
- ② B_{10} (B_5 또는 B_1 등) 수명
- ③ 와이블 확률용지에서 하나의 직선은 하나의 수명분포에 대응하며, 이때 직선의 기울기는 형상모수 β 와 같다. 와이블 확률용지에 직선에 가깝게 데이터들이 타점되었다면, 와이블 분포가 적합함을 의미하며, 직선의 기울기는 다음과 같은 고장 메커니즘에 대한 정보를 제공한다.
 - 기울기가 1이면 고장률이 일정하며, 고장이 우발적으로 발생함을 의미한다.
 - 기울기가 1보다 작으면 고장률이 감소하며, 이는 초기 고장률이 높음을 의미한다.
 - 기울기가 1보다 크면 고장률이 증가하는 마모 고장을 의미한다.



[그림 9] 와이블 분석의 예

6. 맺음말

본 기고는 수원대학교 신뢰성혁신센터에서 수행하고 있는 산업기술기반조성 『신뢰성향상을 위한 표준화 기반구축 및 확산』 사업을 통해 2006년 2월에 발간한 『신뢰성성장 프로그램 Guideline』의 내용을 요약한 것이다. Guideline 발간에 많은 도움을 주신 워킹그룹 위원들과 산업자원부·기술표준원의 담당관들에게 감사드리며, 신뢰성성장 프로그램에 관한 문의는 신뢰성혁신센터 홈페이지(<http://ric.suwon.ac.kr>)를 이용하기 바란다.

참고문헌

- [1] KS A 3004 신인성 용어: 신인성과 서비스 품질, 산업자원부·기술표준원, 2003.
- [2] IEC 60300-3-5, Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles, 2001.
- [3] IEC 61164, Reliability growth – Statistical test and estimation methods, 2004.
- [4] The Useful Life Reliability Initiatives Case Study, Ford, 1994.
- [5] L. H. Crow, "Reliability analysis for complex, repairable systems", Reliability and Biometry, Statistical Analysis of Lifelength, SIAM, Philadelphia, pp. 379-410, 1974.
- [6] L. H. Crow, "Evaluating the Reliability of Repairable Systems", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 275-279, 1990.
- [7] L. H. Crow, "Reliability Growth Estimation with Missing Data", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 248-253, 1988.
- [8] U. S. Mil-HDBK-189, Reliability Growth Management, The National Technical Information Service, Springfield, VA, 1981.