

## 건설장비 개발과정에서 신뢰성성장관리 적용방법에 대한 연구

소영국\* · 전영록\*\* · 류병진\*\*\*

경남대학교/볼보건설기계\* · 경남대학교\*\* · 볼보건설기계\*\*\*

### Application of Reliability Growth Management for Construction Equipment Development Process

Young-Kug So\* · Young-Rok Jeon\*\* · Byeong-Jin Ryu\*\*\*

Kyungnam University/Volvo Constuction Equipment\* · Kyungnam University\*\* · Volvo CE\*\*\*

#### Abstract

This study considers reliability growth management as the excellent method for construction equipment development with the effect on decreasing COPQ(Cost of Poor Quality Cost) of new products. MIL-HDBK-189A(1981) and RADC-TR-84-20(1984) standards provide a general concept of reliability growth management including to reliability growth test, models and FRACAS(Failure Reporting and Corrective Action System). There is no study how to apply reliability growth management to construction equipment(or machine) development. This paper propose the method to apply it to construction equipment development process from the reliability target setting for developing products to launching them at market. It is expecially showing how to set target reliability for new developing equipment and the development risk to reach the reliability target in detail.

Keywords: Reliability Growth Model, Reliability Growth Test, Reliability Growth Management, Reliability Growth Target, Duane Model, AMSAA Model, MIL-HDBK-189A

## 1. 서론

신제품개발에서 신뢰성공학을 적용하는 목적은 고객이 만족하는 수준의 신뢰성을 갖는 제품을 보다 적은 비용과 기간을 들여서 개발하기 위해서다. 1980년대에 신뢰성성장관리개념이 소개되면서 방산 및 수송 장비 등의 완제품 개발과정에 적용되는 사례가 많아지고 있다. 특히 이들 제품처럼 제한된 개발기간과 한정된 시제품만을 가지고 신뢰성시험을 진행하는 개발환경에 적용되고 있다. 신뢰성성장은 시험, 고장분석, 시정조치(Test, Analysis, And, Fix, TAAF)의 프로그램으로, 제품설계 및 공정설계에서 예측하지 못했던 고장을 신뢰성성장시험을 통해서 확인 및 분석하여, 개선방안을 찾아 설계에 반영하여 설계품질향상을 통해서 이루어진다. 신뢰성성장관리는 신뢰성목표를 달성을 위해 개발 초기에 신뢰성성장계획을 수립하고, 개발 중에 각 단계별 개발현황에 대한 관측 및 신뢰성성장시험결과를 평가하여, 성장계획과 비교한다. 이 비교를 통해서 최종개발결과를 예측하고, 신뢰성목표도달이 어렵다고 판단되면 자원이 부족한 부분을 보완하여 개발결과가 신뢰성목표에 도달하도록 신뢰성성장을 향상시키는 개발과정이다.

Kececioglu(1991)는 Gompertz모형, Lloyd-Lipow모형, 로지스틱모형, 수정Gompertz모형, Duane모형, AMSAA(US, Army Material System Analysis Activity)모형 등의 신뢰성성장모형에 대해서 체계적으로 정리하고, 신뢰성성장 곡선을 추정하는 방법에 대해서 설명하고 있다. 이들 모형 중에서 가장 널리 사용되는 신뢰성성장모형은 Duane모형인데, Duane(1964)는 개발과정의 제품고장이 포아송과정으로 발생하는 것을 가정하고 제품의 고장률이 시험시간에 따라 지수적으로 감소하는 신뢰성성장모형을 제안하였다. Crow(1974)은 Duane(1964)의 결과를 확장하여 고장이 비동질포아송과정(Non-Homogeneous Poisson Process)으로 발생하는 경우의 신뢰성성장모형인 AMSAA모형을 제안했고, 그 모형은 확률의 특성을 갖추고 있다.

MIL-HDBK-189A(1981)은 신뢰성성장시험을 포함한 신뢰성성장관리의 기본개념을 제시하고 있다. RADC-TR-84-20(1984)는 신뢰성성장모형들의 특성을 비교하고, 신뢰성성장관리의 주요 구성요소들을 보여주고 있다. 이환태과 정원(2005)은 철도차량개발에서 Duane모형을 적용한 신뢰성성장시험 결과를 제시했다.

본 연구의 대상제품은 굴삭기, 휠로더, 굴절식덤프트럭 등의 건설장비이다. 건설업체들은 2~3년 주기로 새로운 기능과 강화되는 법적규제조항에 적합한 신규장비들을 출시한다. 건설장비는 제품특성상 높은 구매가격 대비 보증기간이 상대적으로 짧기(고개인도 후 1년 또는 특정 운전시간) 때문에, 소비자와 제조자 모두에게 보증기간 내의 품질수준은 매우 민감한 고려사항이다. 그래서 보증기간 내에서 신뢰성목표를 높게 정하고, 최소의 비용과 기간에 새로운 장비가 신뢰성 목표에 도달하도록 개발하는 것이 가장 중요한 개발목표 중에 하나이다.

이 연구에서는 독특한 제품시장과 개발특성을 갖는 건설장비의 개발과정에 적용할 수 있는 신뢰성성장관리 기법을 소개하고, 적용사례를 제시한다. MIL-HDBK-189A(1981)와 RADC-TR-84-20(1984)에서 제시하는 방법을 건설장비의 신뢰성목표 관리에 적합하도록 관리 프로세스를 설계하고, 신뢰성성장 시험계획의 수립방법과 절차를 제시한다. 제2절은 신뢰성성장관리의 개념을 소개하고, 제3절에서는 건설장비개발에서 신뢰성성장관리의 적용방안과 신뢰

성성장시험의 계획수립 방법을 제안한다. 제4절에서는 건설장비개발에서 신뢰성성장관리의 적용방법을 적용한 적용사례를 소개한다.

## 2. 신뢰성성장모형 및 관리

신뢰성성장은 계획된 개발활동과 진행결과를 비교하여 자원이 부족한 부분을 찾아 보완하여 미리 설정한 신뢰성목표에 도달할 수 있도록 하는 것이다. 신뢰성성장은 신뢰성성장모형, 신뢰성성장시험, 신뢰성성장관리로 구분하여 다룰 수 있다.

### 2.1 신뢰성성장모형

신뢰성성장모형은 개발단계에서 이용 가능한 정보를 이용하여 개발 종료시점에서 신뢰성수준을 예측하는데 사용된다. 신뢰성성장모형에는 Gompertz모형, Lloyd-Lipow모형, 로지스틱모형, 수정Gompertz모형, Duane모형, AMSAA모형 등이 있다. 신뢰성성장모형은 신뢰성성장 시험계획수립과 신뢰성예측의 정확도에 큰 영향을 주므로 주어진 상황에 적합한 모형을 선택해야 한다. 여기서는 건설장비나 수송장비와 같이 수리계시스템에 가장 널리 사용되고 있는 모형인 Duane모형과 AMSAA모형에 대해서 간략히 소개한다.

#### 2.1.1 Duane모형

Duane(1964)이 제안한 신뢰성성장모형으로 신뢰성성장 패턴이 한 가지 유형으로 정해진다. Duane모형은 누적고장률(cumulative failure rate)이 누적시험시간(cumulative test time)과 대수선형관계로 가정한 모형으로 고장이 포아송과정에 따라 발생하는 시스템에 적합하다. 여기서 누적고장률은 누적고장회수를 누적시험시간으로 나누어 계산한 것으로 주어진 시점까지의 단위시간당 고장회수이다. 누적시험시간  $T$ 와 누적고장률  $\lambda_c(T)$ 을 이용한 Duane모형은

$$\lambda_c(T) = \lambda_0(T/T_0)^{-G} \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $\lambda_0$ 는 신뢰성성장의 시작시점  $T_0$ 에서의 누적고장률이고,  $G$ 는 신뢰성성장률로써  $0 \leq G \leq 1$ 이며, O' Connor(2007)는 0.2에서 0.6까지의 사용범위를 제안했다. 누적시험시간  $T$ 에서 계산한 누적 평균고장간시간(MTBF, mean time between failure)을  $M_c(T)$ 이라 하면,  $M_c(T) = 1/\lambda_c(T)$  이고,  $M_0 = 1/\lambda_0$  이므로 식(1)은

$$M_c(T) = M_0(T/T_0)^G \tag{2}$$

가 된다. 식(2)은 시간에 따라 MTBF가 성장하는 모형이므로 MTBF성장모형이라 부르기도 한다. 식(2)의 양변에 대수를 취하면

$$\ln(M_c(T)) = \ln(M_0/T_0^G) + G \cdot \ln(T) \quad (3)$$

이 되어 MTBF와 누적시험시간이 대수선형관계임을 확인할 수 있다. 시점 T에서 순간고장률  $\lambda_i(T)$ 는

$$\lambda_i(T) = (1 - G)\lambda_c(T) \quad (4)$$

로 구하고, 순간 MTBF는  $M_i(T) = 1/\lambda_i(t) = M_c(T)/(1 - G)$  가 된다. 신뢰성성장률 G는 식(3)의 관계식으로부터 관측시점에서 누적시험시간과 누적MTBF를 대수-대수용지(log-log paper)에 타점한 점들이 나타내는 직선의 기울기로 추정한다.

### 2.1.2 AMSAA모형

AMSAA모형은 AMSAA에서 근무했던 Crow(1974)에 의해서 발견된 모형이다. AMSAA모형은 Duane모형의 확률적 확장형이며, 각 시험단계에서 고장이 비동질적 포아송과정으로 발생하는 것을 가정한 모형이다. AMSAA모형에서 고장률은 고장률함수의 모수(parameter)에 따라 다양한 형태를 가질 수 있다. Dimitri(2002)는 고장패턴이 와이블과정을 따르는 누적시험시간 T에서의 강도함수를

$$\lambda_i(T) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (5)$$

로 나타냈다. 여기서  $\eta$ 와  $\beta$ 는 각각 와이블과정을 따르는 분포의 척도모수와 형상모수이다. 식(5)로부터 순간 MTBF  $M_i(T)$ 는 다음과 같이 된다.

$$M_i(T) = \frac{1}{\lambda_i(T)} = \frac{\eta}{\beta} \left( \frac{T}{\eta} \right)^{1-\beta} \quad (6)$$

$N(T^*)$ 을 누적시험시간  $T^*$ 에서의 총 고장회수라 하면, 확률변수  $N(T^*)$ 는 포아송분포를 따른다.  $\bar{N}(T^*)$ 를  $T^*$ 에서 평균고장회수라 하면  $T^*$ 까지 n회의 고장이 발생할 확률은

$$P\{N(T^*) = n\} = \frac{[\bar{N}(T^*)]^n e^{-\bar{N}(T^*)}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

이고,  $\bar{N}(T^*)$ 는 고장률함수가 식(5)과 같을 때

$$\bar{N}(T^*) = \int_0^{T^*} \lambda_i(T) dT = \left(\frac{T^*}{\eta}\right)^\beta \tag{8}$$

가 된다. 식(8)의 양변에 대수를 취하면  $\bar{N}(T^*)$ 와  $T^*$ 의 관계식

$$\ln[\bar{N}(T^*)] = \beta \cdot \ln(T^*) - \beta \cdot \ln(\eta) \tag{9}$$

을 얻는다. 식(9)의 관계식을 이용하여 누적시험시간과 평균고장회수를 대수-대수용지에 타점하여 나타난 직선의 기울기와 절편을 이용하여 모수  $\beta, \eta$ 의 추정치를 구할 수 있다. 여기서 고장의 수가 비동질포아송과정(Non-Homogeneous Poisson Process, NHPP)을 따르면, 누적 고장률 함수는

$$\lambda_{cum}(T) = \frac{1}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{10}$$

이다. 그리고 시점  $T_0$ 에서의 순간고장률

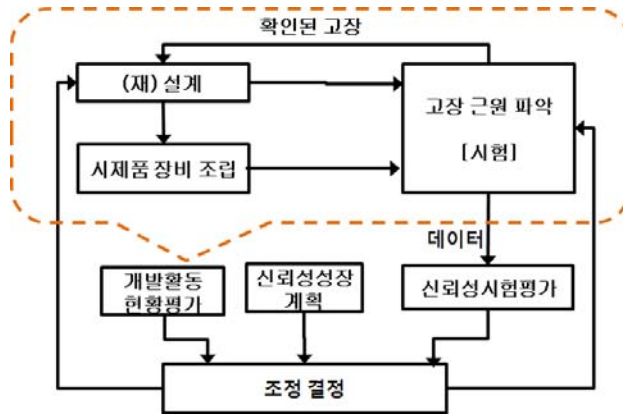
$$\lambda_i(T_0) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{11}$$

로부터 순간 MTBF  $M_i(T_0)$ 는  $T_0$  이후에 시스템의 개선이 없으면 고장률이  $\lambda_i(T_0)$ 로 일정한 것으로 간주하고 다음 식으로 구한다.

$$M_i(T_0) = \frac{\eta}{\beta} \left(\frac{T_0}{\eta}\right)^{1-\beta} \tag{12}$$

## 2.2 신뢰성성장관리

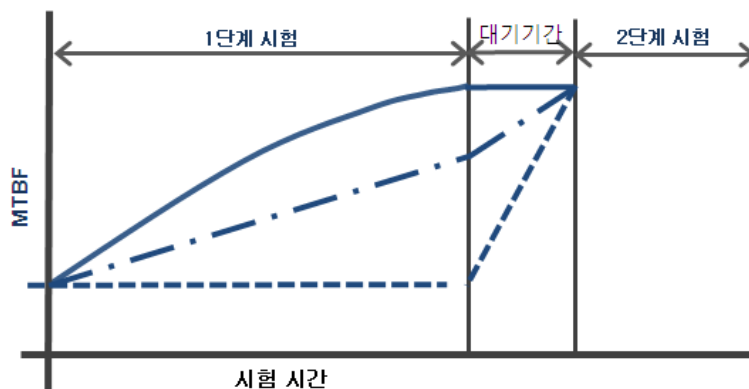
MIL-HDBK-189A(1981)에 따르면 신뢰성성장관리의 적용효과는 신제품의 개발과정에서, 개발제품의 신뢰성이 신뢰성목표에 도달할 수 있도록 계획하고, 지속적인 평가를 통해서 신뢰성성장목표를 달성할 수 있도록 개발과정을 조정하여 신뢰성성장률을 향상시킬 수 있도록 개발자들을 도와준다. 여기서는 신뢰성성장관리의 계획, 평가 및 관리의 역할에 대해서 정리했다.



<그림 1> 신뢰성성장관리 (MIL-HDBK-189A(1981))

### 2.2.1 신뢰성성장 계획단계

<그림 1>에서의 “신뢰성성장계획”은 제품개발 초기에 수립되며, 신제품의 신뢰성목표를 설정하고, 그것을 달성하기 위한 신뢰성성장을 시간과 기타 자원의 함수로 계획한다. 그 신뢰성성장은 신뢰성성장시험 계획을 통해서 도식적으로 표현된다. 그것을 작성하기 위해서는 신뢰성목표, 신뢰성성장모형의 결정되어야하고, 신제품개발과 관련된 품질저하를 나타낸 개발위험값 및 시험시간 등의 결정이 필요하다. 또한 <그림 2>와 같이 시험 중에 확인된 고장의 해결책에 대한 3가지 적용방안 중에 하나는 선택해야하는데, 1) 시험 중에 모든 해결책을 적용(Test-Fix-Test : TFT)하거나 2) 해결책 중에 일부는 시험 중에 적용하고 일부는 시험이 완료된 후에 적용(Test-Fixed-Test-Delayed : TFTD) 한다. 마지막으로 3) 해결책을 시험이 완료된 후에 적용(Test-Delayed-Test : TDT)하는 것이다.



<그림 2> 신뢰성성장시험 해결책 적용방식

### 2.2.2 신뢰성성장 평가단계

개발진행 중에 개발단계별 현황 및 신뢰성시험결과를 바탕으로 계획대비 진행결과를 평가해야 한다. <그림 1>에서 “개발활동현황평가” 및 “신뢰성시험평가” 부분이다. 개발활동현황평가는 계획 대비 도면작성 또는 시제품 제작현황 등이며, 신뢰성시험평가는 평가시점에서의 가동시간과 누적고장수를 바탕으로 신뢰성 값을 계산하고 계획된 신뢰성목표와 비교 평가한다.

### 2.2.3 신뢰성성장 조정단계

<그림 1>에서 “조정결정“에 해당된다. 신뢰성성장 평가결과가 계획된 신뢰성목표달성이 어렵다고 예측되었을 때 목표달성을 위해 개발과정을 조정하여 신뢰성성장률을 향상시킨다. 그 조정에는 첫째는 자원이 부족한 개발부분을 보완하고, 두 번째는 신뢰성시험 중에 확인된 고장들에 대해서 해결할 고장모드의 종류를 늘리거나, 고장 수리의 효과를 증대시키는 것이다.

## 3. 건설장비개발에서 신뢰성성장관리 적용

건설장비는 고정상태에서 운용되는 일반기계나 이동수단으로 사용되는 단순 수송장비와는, 그 용도 및 고장특성에 있어서 차이가 많다. 이 절에서는 건설장비의 신뢰성 특성을 소개하고, 신뢰성성장관리의 적용 방법에 대해서 다룬다.

### 3.1 건설장비의 주요 특성

#### 3.1.1 일반적 특성

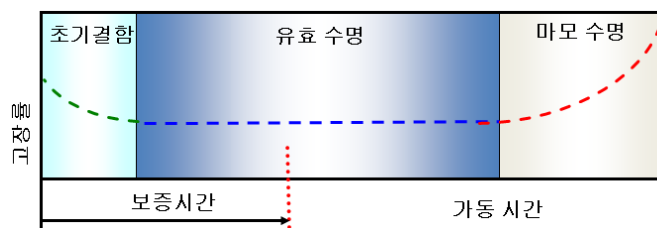
건설공사에 사용되는 굴삭기, 로우더, 험지덤프트럭 등이 건설장비이다. 대형공사와 난공사에서 인간대신 안전하고 효율적으로 작업하며, 경비절감 및 공사시간 단축에 기여한다. 건설장비의 주요특성은 <표 1>과 같이 작업조건, 고장특성, 품질보증으로 구분하여 정리할 수 있다.

<표 1> 건설장비의 주요 특성

구분	작업조건	고장특성	품질보증
주요 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가혹한 작업 조건 - 고온/저온, 고습, 심한 진동 및 소음 등</li> <li>• 연속적 가동 - 주야 연속 가동, 연 300일 이상 가동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가혹한 작업 조건으로 인한 고장이 많음</li> <li>• 누유, 볼트 풀림, 전기/전자 부품의 접촉 불량, 마운트부의 균열, 시동불량 (혹한 지역) 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보증기간 짧음 - 무상 수리보증 1년 또는 운전시간 2,000시간 내외</li> <li>• 보증수리비용 높음 - 가혹한 작업조건으로 인해 고장이 잦음</li> </ul>

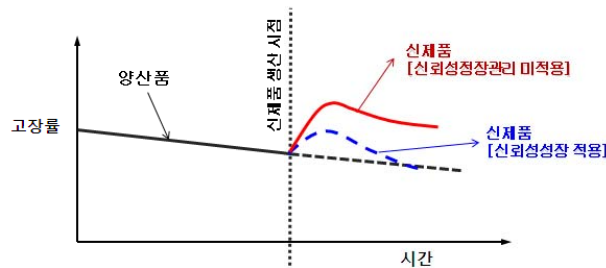
### 3.1.2 고장률 특성

건설장비는 수리계로 신뢰성평가와 신뢰성목표는 MTBF을 이용한다. 초기결함 시간을 제외한 보증기간 내의 고장 간 시간은 지수분포를 따르는 것으로 가정하는 경우가 많다. 또한 장비의 중요 부품인 엔진, 유압부품, 센서 및 구조물 등은 비수리계로 간주하고, 이들 부품들의 신뢰성은 장비시험에 앞서 검증되어야 한다. 건설장비의 고장률은 <그림 3>와 같은 육조곡선에 부합하는 것으로 가정한다.



<그림 3> 건설장비의 고장률 곡선

본 연구에서의 장비개발은 기존 양산품(이하 ‘기준장비’라 함)을 대체하기 위해 기준장비 대비 60% 이내에서 설계변경을 통해서 개발된다. 개발비용절감과 각종 환경/안전 관련 법적 규제를



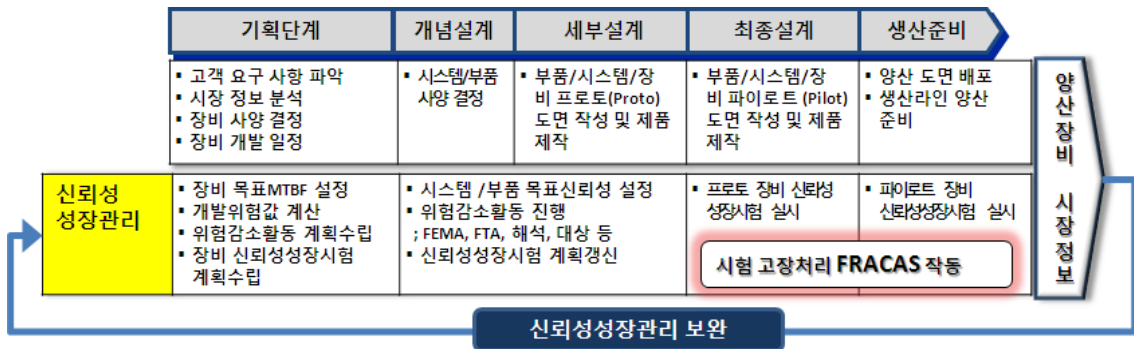
<그림 4> 설계개선 신제품의 고장률 양상

만족시키기 위해 개발기간은 3년 이내이며, 신제품의 신뢰성목표는 보증기간까지의 MTBF로 설정한다. 건설장비개발에서의 신뢰성성장관리의 적용목적은 <그림4>과 같이 개발과정에서 신뢰성을 향상시켜, 양산 초기의 높은 고장률을 최대한 단기간에 안정화시키기 위함이다.

### 3.1.3 건설장비개발과정에서 신뢰성성장관리

신뢰성성장관리는 <그림 5>와 같이 기획단계에서부터, 생산준비까지의 전 개발단계에 걸쳐 적용된다. 최종설계 및 생산준비 단계에서는 프로토타입 및 파이롯트장비를 이용하여 신뢰성성장시험을 진행하면서 고장을 확인하고, 그 해결책을 찾아 설계에 반영한다.





<그림 5> 건설장비의 신뢰성성장관리

1) 기획단계는 양산장비(기준장비)의 신뢰성수준을 분석 및 개발장비의 신뢰성목표(MTBF)를 결정하고, 양산장비 기준 신제품에서의 설계변경량을 고려한 개발위험값을 계산한다. 개발위험값의 감소를 위한 위험감소활동계획과 장비 신뢰성성장시험계획을 수립한다. 2) 개념설계단계에서는 시스템/부품의 사양과 신뢰성목표를 설정하고, 시스템해석, FTA, FMEA 등의 위험감소활동을 실시한다. 개념설계결과를 신뢰성성장시험계획에 반영한다. 3) 세부설계단계는 프로토 도면작성 및 프로토타입을 제작한다. 시스템해석과 단품시험 등의 진행결과를 FMEA 반영한다. 진행결과를 신뢰성성장시험계획에 반영한다. 4) 최종설계단계에서는 파이로트 도면작성 및 배포하고, 파이로트제품을 제작한다. 그 시점에 프로토타입의 신뢰성성장시험을 진행하면서 결과를 파이로트 도면 및 제품에 반영한다. 5) 생산준비단계는 최종양산사양을 결정하고 양산준비를 한다. 파이로트장비에 대한 신뢰성성장시험을 진행하면서, 그 결과를 양산도면에 반영한다. 신뢰성성장시험 중에 파악된 고장들의 해결책들을 양산에 반영하고, 양산 후 시장의 반응을 개발과정에 반영한다.

### 3.2 신뢰성성장시험계획

개발장비의 신뢰성성장시험계획은 기획단계에서 수립되고, 후속 개발단계들의 결과를 반영하여 수정한다. 계획수립은 입력정보산정과 시험계획수립 단계로 구성된다. 입력정보산정은 신뢰성성장모형 선택, 신뢰성목표 설정, 개발위험값 계산 등으로 구성된다. 시험계획수립은 입력정보산정 단계의 결과를 바탕으로 필요한 시험시간을 결정하고 성장곡선을 작성한다.

#### 3.2.1 입력정보산정

(1) 신뢰성성장모형 선정: 건설장비는 대표적인 수리계시스템이며, Duane모형과 AMSAA모형이 적합하며, 일반적으로 Duane모형을 선호하고 있으며, 제품고장에 대한 모형의 적합 정도를 고려하여 AMSAA모형을 적용할 수도 있다.

(2) 개발장비 신뢰성목표 MTBF 설정: 신뢰성목표는 초기고장단계를 벗어난 보증기간까지의 기간 내의 MTBF로 하며, 기준이 되는 양산장비의 MTBF 보다 10~50% 높게 산정된다.

(3) 개발위험값(Developing Risk Value) 계산: 이 값은 양산장비를 기준하여 개발장비에서의 설계변경량에 따른 고장률 증가량을 나타낸 값으로 ARINC Apportionment 방법과 본 연구를 통해 얻어진 여러 제품결과들을 반영하여 정립하였다. 장비를 구성하고 있는 시스템들이 직렬계를 구성하고 있다는 전제 아래에, 전체의 장비개발 개발위험값  $DRV_E$ 는, 장비를 구성하는 각 시스템  $i$ 의 개발위험값  $DRV_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  라 하면

$$DRV_E = \sum_{i=1}^k DRV_i \quad (13)$$

로 구한다. 여기서  $DRV_i$ 는 각 시스템  $i$ 가 양산장비의 해당 시스템에 대비하여 설계변경률과 고장의 가중치를 반영한 시스템별 개발위험값이며, 그 계산방식은

$$DRV_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_E} \times \rho_i \quad (14)$$

이고,  $\lambda_E$ 는 기준장비의 고장률( $\lambda_E = \sum \lambda_i$ ),  $\lambda_i$ 는 기준장비의 시스템  $i$ 의 고장률,  $\rho_i$ 는 시스템  $i$ 의 설계변경률이다. 설계변경률은 기준장비 대비 장비전체의 설계변경량이며, 통상 60% 이내의 설계변경의 장비에 대해서 신뢰성성장관리를 적용한다. 개발위험값의 개념은 본 연구를 위한 여러 제품결과를 통해 정립하였고, 그 값은 신뢰성성장시험에 중요한 영향을 줄을 확인하였다. 그 값을 줄이기 위한 개발위험감소활동을 수행한 경우에는 위험감소율을 반영한 최종개발위험값(Final Developing Risk Value)을 적용한다. 각 시스템  $i$ 의 최종개발위험값  $FDRV_i$ 는

$$FDRV_i = DRV_i \times (1 - \delta_i), \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (15)$$

으로 계산한다. 여기서  $\delta_i$ 는 시스템  $i$ 의 위험감소율로서 엔지니어의 경험을 바탕으로 결정된다. <표 2>는 개발위험값의 계산결과이며, 장비를 5개의 시스템으로 나누었다. 각 시스템의 고장률과 설계변경률을 이용하여 개발위험값을 계산하고, 위험감소활동을 반영하여 최종개발위험값을 계산한다. 장비 전체의 개발위험값은  $DRV_E = 54.57$  이고, 위험감소활동을 반영한 최종개발위험값은  $FDRV_E = 40.7$  이다.

<표 2> 개발위험값 계산

하위시스템	고장률(A)	고장률 가중치(B)	설계 변경률(C)	DRV (D=B×C)	위험 감소율(E)	FDRV (F=D×(1-E))
시스템1	1.5	0.0857	100	8.57	0.25	6.43
시스템2	2.5	0.1429	80	11.43	0.35	7.43
시스템3	3.5	0.2000	100	20.00	0.25	15.00
시스템4	4.5	0.2571	20	5.14	0.23	3.96
시스템5	5.5	0.3143	30	9.43	0.16	7.92
합계	17.5	1		54.6		40.7

### 3.2.2 시험계획 수립

신뢰성성장시험은 일반적으로 프로토타입과 파이로트장비로 나누어 2단계로 시험을 실시한다. 그 목적은 프로토타입을 이용하여 초기 설계품질문제를 확인 및 개선하고, 그 해결책 중에 장비에 적용되지 않는 아이템 및 프로토타입에 반영하지 못한 설계변경을 파이로트장비에 반영하여 양산 전에 검증하기 위해서 이다. 각 장비 설계품질의 Duane모형을 적용하는 경우에 신뢰성시험의 총 시험시간 T는 식(2)을 변환한

$$T = T_0 \left( \frac{M}{M_0} \right)^{1/G} \tag{16}$$

로 구한다. 여기서 T와 M은 누적시험시간과 그 시간에서 누적 MTBF이다

(1) 프로토타입시험: 신뢰성성장 시작시간  $T_{01}$ 는 일반적으로 100 시간으로 한다. 신뢰성 성장률 G는 0.2~0.6에서 개발경험을 바탕으로 정한다. 프로토타입의 신뢰성목표인  $M_1$ 은 장비의 신뢰성목표  $M_E$ 과 최종개발위험값인  $FDRV_E$  값을

$$M_1 = M_E \times \frac{(100 - FDRV_E)}{100} \tag{17}$$

에 적용하여 구한다. 위의 프로토타입의 MTBF목표  $M_1$ 와 개발장비의 MTBF목표  $M_E$ 의 관계는 본 연구의 여러 제품개발결과를 통해서 확인된 내용으로, 프로토타입의 설계품질수준은 최종 양산제품의 품질수준인  $M_E$  대비하여 최종개발위험값에 비례하여 낮음을 확인되었고 이를 정량화 시킨 것이다. 신뢰성성장 시작시간  $T_{01}$ 에서의 MTBF인  $M_{01}$ 는

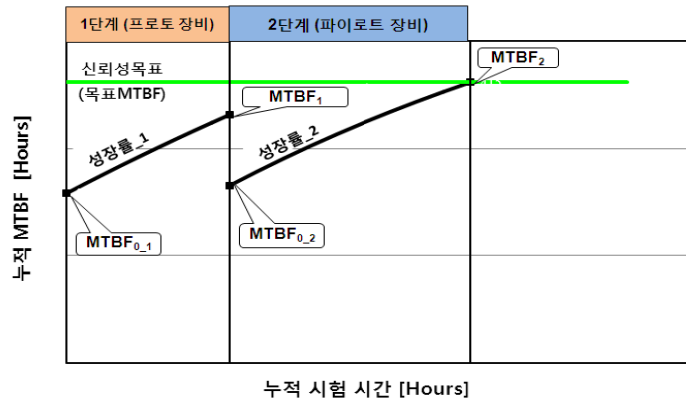
$$M_{01} = M_1 \times \pi_1 \tag{18}$$

을 이용하여 프로토장비의 신뢰성목표인  $M_1$ 의 일정비율로 한다. 여기서  $\pi_1$ 는 제품개발경험과 제품특성을 고려하여 0.1로 한다. 예로써,  $M_E = 1,000$  시간과  $G = 0.5$  로 가정한 경우,  $M_1 = 1,000 \times (100 - 40)/100$  시간이 되고,  $M_{01} = M_1 \times \pi_1 = 600(0.1) = 60$  시간이다. 위의 결과와 식(16)을 이용하여 계산된 시험시간인  $T_1 = 100 \times (600/60)^{1/0.5} = 10,000$  시간이다. 이 부분에서 설정된 장비의 신뢰성목표  $M_E$ 로부터 프로토장비의 신뢰성목표  $M_1$  및 신뢰성성장 시작시점에서의  $M_{01}$ 의 설정방식은 MIL-HDBK-189A(1982), RADC-TR-84-20(1984)을 기초하여 여러 건설장비 개발결과를 바탕으로 정립된 방식이다.

(2) 파이로트 장비시험: 파이로트장비의 신뢰성성장 시작시간  $T_{02}$ 도 100시간으로 하고, 신뢰성성장률  $G$ 는 0.2~0.6에서 제품개발경험을 바탕으로 정한다.  $T_{02}$ 에서 MTBF인  $M_{02}$ 는

$$M_{02} = M_2 \times \pi_2 \tag{19}$$

과 같이 파이로트장비의 신뢰성목표(MTBF)  $M_2$ 의 일정비율로 한다. 여기서  $M_2$ 는 장비의



<그림 6> 신뢰성성장 시험계획

신뢰성목표 MTBF인  $M_E$ 와 같다. 시험시간 계산방식은 프로토장비 시험의 경우와 동일하다. 위의 결과들을 바탕으로 <그림 6>와 같은 신뢰성성장시험계획이 수립된다.

## 4. 적용사례

본 사례는 본 연구를 통해서 정립된 신뢰성성장관리를 적용하여 개발한 굴삭기 B제품의 적용사례이다. B제품은 북미시장을 목표로 개발되었고, 기존 양산장비인 A제품을 바탕으로 설계 변경한 제품이며, 신뢰성성장시험을 포함해서 3년 동안 개발되었다.

### 4.1 신뢰성성장시험 계획

(1) 신뢰성성장모형 선정: 굴삭기는 다수의 하위시스템으로 구성된 장비로 고장이 근사적인 포아송과정으로 발생한다는 가정아래, Duane모형을 선정하였다.

(2) 개발장비 신뢰성목표인 MTBF 설정: 기존 양산장비의 품질수준을 확인한 결과 600시간 MTBF 정도수준이었다. 신제품으로 대체되는 시점까지의 품질개선률이 17% 이고, 이를 개발장비의 신뢰성목표인  $M_E = 600 + 600 \times 0.15 = 690 \approx 700$  시간으로 설정했다.

(3) 개발위험값 계산: 개발대상 장비는 엔진부, 운전석부, 몸체부, 작업장치부, 유압장치부, 전기/전자시스템부로 구성된다. <표 3>은 양산장비인 A모델의 시스템별 고장률, 개발장비 B모델에서 각 하위 시스템의 설계변경률 및 위험감소율을 나타낸 것이다.

<표 3> 하위시스템의 고장률, 설계변경률, 위험감소율

	엔진부	운전석부	몸체부	작업장치부	유압장치부	전기/전자부
고장률	0.125	0.324	0.111	0.124	0.236	0.245
설계변경률	50	40	60	20	50	40
위험감소율	0.46	0.23	0.35	0.25	0.34	0.39

<표 4>에서와 같이 장비고장률  $\lambda_E = 1.165$  이고, 각 하위시스템의 고장률가중치는 엔진부 0.11, 운전부 0.28, ... , 전기/전자시스템부 0.21이다. 장비의 개발위험값은 각 하위시스템의 개발위험값을 합하면 42.88이고, 위험감소율을 반영하면 장비의 최종개발위험값 28.59를 얻는다.

<표 4> 개발위험값 계산

하위시스템	고장률(A)	고장률 가중치(B)	설계 변경률(C)	DRV (D=B×C)	위험 감소율(E)	FDRV (F=D×(1-E))
엔진부	0.125	0.1073	50	5.36	0.46	2.90
운전석부	0.324	0.2781	40	11.12	0.23	8.57
몸체부	0.111	0.0953	60	5.72	0.35	3.72
작업장치부	0.124	0.1064	20	2.13	0.25	1.60
유압장치부	0.236	0.2026	50	10.13	0.34	6.68
전기/전자부	0.245	0.2103	40	8.41	0.39	5.13
합계	1.165	1.0000		42.88		28.59

(4) 프로토타입 시험계획: 전체의 설계변경량을 고려하여 신뢰성성장시험은 프로토타입과 파일럿 장비시험으로 나누고, 시험 중에 발견된 고장에 해결책은 해당 시험 과정과 다음 단계의 시험 시작 전에 적용기로 하였다. 프로토타입 장비시험에서 신뢰성성장률은  $G = 0.2$  로 하고,  $\pi_1 = 0.1$ 로 설정했다. 프로토타입 장비시험의 목표MTBF는 식(17)로부터

$$M_1 = M_E \times \frac{100 - FDRV_E}{100} = 700 \times \frac{100 - 28.59}{100} = 499.87 \approx 500 \text{ 시간}$$

이다. 따라서  $M_{01} = M_1 \times \pi_1 = 500(0.1) = 50$  시간이며, 식(16)로부터 프로토타입 장비시험의 시험시간인  $T_1 = T_{01} \times (M_1/M_{01})^{1/G} = 100(500/50)^{1/0.5} = 10,000$  시간으로 한다.

(5) 파일럿 장비 시험계획: 파일럿 장비시험의 신뢰성성장률은  $G = 0.35$  로 하고,  $\pi_2 = 0.15$  로 설정한다. 파일럿 장비시험의 신뢰성목표 MTBF인  $M_2$ 는 장비의 MTBF와 동일하게 700 시간으로 정하고,  $M_{02} = 700(0.15) = 105$  시간이다. 식(17)을 이용하면 파일럿 장비시험의 시험시간  $T_2$ 는  $T_2 = T_{02} \times (M_2/M_{02})^{1/G} = 100(700/105)^{1/0.35} = 22,600$  시간으로 한다.

(6) 신뢰성성장시험 계획수립: 신뢰성성장시험은 프로토타입 장비시험 10,000 시간과 파일럿 장비시험 22,600 시간으로 2단계 시험이고, <표 5>는 신뢰성성장시험 계획을 요약한 것이다.

<표 5> 신뢰성성장시험 계획요약

	목표MTBF	시작시간( $T_0$ )	시작MTBF( $M_0$ )	신뢰성성장률( $G$ )	총 시험시간( $T$ )
프로토타입	500	100	50	0.50	10,000
파일럿 장비	700	100	105	0.35	22,600

## 4.2 시험수행 및 결과해석

장비의 신뢰성성장시험은 장비용도에 맞는 고객작업장에서 진행하였다. 장비상태는 온라인과 주기적인 육안검사/성능체크를 통해 확인되었다. <표 6>와 <표 7>는 프로토타입 장비와 파일럿 장비시험결과의 일부로서 누적시험시간, 누적고장수, 누적MTBF를 나타낸 것이다.

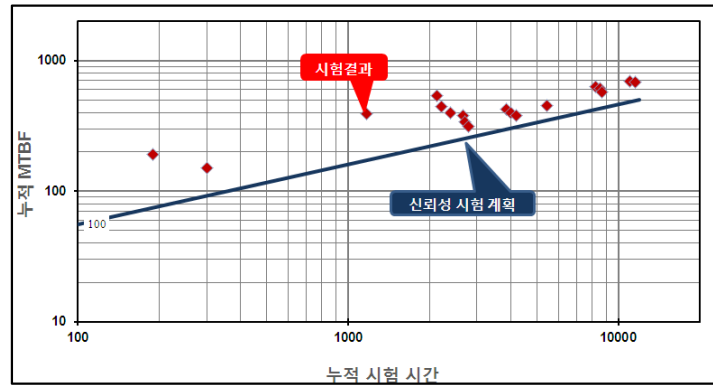
<표 6> 프로토타입 장비 시험결과

누적시험시간(A)	누적고장수(B)	누적MTBF(C=A/B)	ln(A)	ln(C)
190	1	190.0	5.247	5.247
300	2	150.0	5.704	5.011
1,170	3	390.0	7.065	5.966
2,140	4	535.0	7.669	6.282
...	...	...	...	...

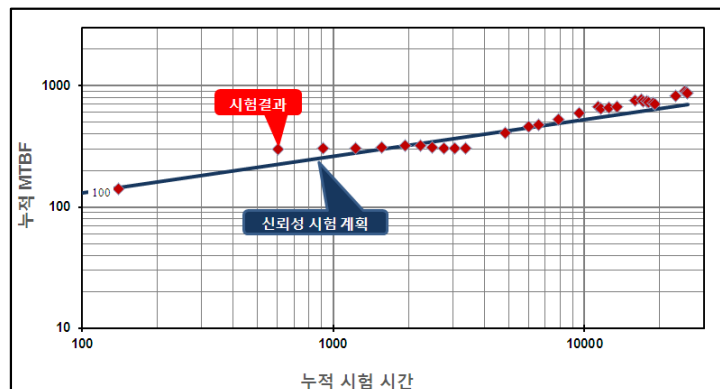
<표 7> 파이로트장비시험 결과

누적시험시간(A)	누적고장수(B)	누적MTBF(C=A/B)	ln(A)	ln(C)
140	1	140.0	4.942	4.942
602	2	301.0	6.400	5.707
914	3	304.7	6.818	5.719
1,225	4	306.3	7.111	5.724
...	...	...	...	...

<그림 7>과 <그림 8>은 위의 <표 6>과 <표 7> 시험결과를 대수-대수용지(log-log paper)에 타점한 것이다. 두 그림에서 보면 시험시간과 MTBF가 선형관계가 됨을 보여주고 있다. <그림 7>에서 보면 프로토장비시험에서 시험 결과로 구한 MTBF(타점된 점들)가 목표 MTBF(직선) 보다 다소 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 <그림 8>의 파이로트장비시험에서는 시험결과로 구한 MTBF는 신뢰성목표 MTBF에 이상임을 확인할 수 있다.



<그림 7> 시험계획 대비 결과 : 프로토장비



<그림 8> 시험계획 대비 결과 : 파이로트장비

## 5. 결론

본 연구에서는 건설장비의 신제품 개발과정에서 신뢰성성장관리를 적용하는 절차를 소개하고 적용사례를 제시하였다. 건설장비는 일반기계, 자동차 등과 다른 고유의 특성을 갖고 있다. 신뢰성성장관리는 제품개발 기획단계에서 생산준비단계의 전 과정에서 적용하며, 프로토타입과 파이로트장비에 대한 신뢰성성장시험을 수행한다.

신뢰성성장시험은 신뢰성목표와 개발위험값을 기반으로 시험계획을 수립하고, 시험을 진행하면서 신뢰성목표 MTBF와 시험결과로 추정된 MTBF를 비교하여 자원을 재분배 등의 관리를 통해 신뢰도목표에 도달한다. 시험 종료 후에는 신뢰성성장시험 중에 파악된 고장에 대해 해결방안을 찾아 양산장비에 반영하고, 시장결과를 바탕으로 개발과정을 보완한다.

## 참고문헌

- [1] Duane, J.T.(1964), "Learning curve approach to reliability monitoring", IEEE Transactions on Aerospace, Vol.2, pp.563-566.
- [2] MIL-HDBK-189A(1981), Reliability growth management, U.S Army Communications Research and Development Command, Fort Monmouth, NJ 07703.
- [3] RADC-TR-84-20(1984), "Reliability Growth Testing Effectiveness", Air Force Systems Command, NY, 13441.
- [4] 정원 외(2001), "A Classification and Selection of Reliability Growth Models", 품질경영학회지, 제3권 제1호/11.
- [5] MIL-HDBK-189C(2009), Reliability growth management, U.S Army Communications Research and Development Command, Fort Monmouth, NJ 07703.
- [6] 이환태, 정원(2005), "시스템의 개발 및 초기생산 단계에서의 신뢰성 성장관리", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, Vol.5, pp.50-55.
- [7] 고정 외(2006), "신뢰성 성장 프로그램", 신뢰성 응용연구, 제6권, 제1호, pp.13-25.
- [8] Kumaraswamy, K.G.(2002), "Reliability Growth Management during Prototype Development", Defence Science Journal, Vol. 52, No. 4, pp.385-392.
- [9] Gertsbakh, I.B.(1989), Statistical Reliability Theory, MARCER DEKKER, pp.41-68.
- [10] O' Connor, P.D.T.(2007), Practical Reliability Engineering, 45h ed. New York, John Wiley & Sons.
- [11] Dimitri, K(2002), Reliability Engineering Handbook, Prentice Hall, Volume2,
- [12] Crow, L.H.(1974), "Reliability analysis for complex, repairable systems", Reliability and Biometry, Statistical Analysis of Lifelength, SIAM, Philadelphia, pp. 379-410.