

원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 방안

서양우*, 김희욱, 김소정, 김용근
LIG넥스원 PGM IPS연구소

A Method of Reliability Growth Test Design for One-shot System

Yang-Woo Seo*, Hee-Wook Kim, So-Jung Kim, Yong-Geun Kim
Precision Guided Munition Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

요약 본 논문은 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 방안을 제시하였다. 우선 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 절차를 제시한 후 각각의 세부 활동을 제안하였다. 제안한 절차에 따라 000 원샷 시스템에 대하여 신뢰성 성장 시험 사례분석을 수행하였다. 신뢰성 성장 시험 데이터가 고장모드가 동일한 형태가 있기 때문에 데이터 유형은 이산형 데이터 중의 고장모드를 포함하는 순차적 데이터 유형으로 선정하였다. 이 때, 신뢰성 성장 모델은 시험-수정조치-시험을 수행하는 가장 일반적으로 적용되는 Standard Gompertz 모델을 선정하였다. 발사시험 13발에 대한 신뢰성 성장 시험 분석 결과는 신뢰성 86.23 %로 목표 값에 미충족되는 결과이었다. 따라서, 추가 발사시험을 통해 신뢰성 목표 값을 만족시키기 위해 대안분석을 수행하였다. 13발 이후의 추가 발사시험이 성공되는 경우는 추가로 2발 발사시험이 필요하며, 신뢰성 값은 91.16 %이었다. 추가 발사시험을 수행하면서 1발이 실패하는 경우는 추가로 5발 발사시험이 필요하며, 신뢰성 값은 90.83 %이었다. 추가 발사시험을 수행하면서 2발이 실패하는 경우는 추가로 7발 발사시험이 필요하며, 신뢰성 값은 90.28 %이었다. 본 연구의 결과는 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 시 자원 재할당을 하는데 유용하게 활용할 수 있다. 또한, 모든 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 수립 시에 활용 가능하다.

Abstract In this article, we propose a method of reliability growth test design for one-shot systems. First, the procedure for the reliability growth test design for the one-shot system was presented. Then, the detailed activities in each step in the procedure were proposed. A case analysis of the reliability growth test was performed on the 000 one-shot system in accordance with the proposed procedure. Since the reliability growth test data has the same failure mode, the data type was selected to be sequential with the mode data containing failure mode among the discrete data. At this time, the reliability growth model used the most commonly used Standard Gompertz model to perform the test-fix-test. The results of the reliability growth test for 13 launch tests showed 86.23% reliability which did not meet the reliability target. So, an alternative analysis was performed to achieve the reliability target through additional launch tests. If additional launch tests after the 13 launch tests do not fail, additional two launch tests were required for the alternative analysis, and the reliability value for this case was 91.16%. If they fail once, additional five launch tests were required, and the reliability value for this case was 90.83%. Furthermore, if additional launch tests fail twice, additional seven launch tests were required, and the corresponding reliability value was 90.28%. The results of this study can be useful in resource reallocation when designing reliability growth tests for a one-shot system. Also, it can be used when establishing the design of reliability growth tests for all one-shot systems.

Keywords : Reliability Growth Test, Reliability Growth Model, Failure Mode, One-shot System, Discrete Data

*Corresponding Author : Yang-Woo Seo(LIG Nex1)

email: yangwoo.seo2@lignex1.com

Received August 10, 2021

Revised August 26, 2021

Accepted December 6, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

신뢰성 성장 시험은 신뢰성 목표 값 달성과 관련된 활동으로 계획된 신뢰성 대비 현재의 신뢰성을 정량화하는데 목적이 있다[1]. 신뢰성 성장 시험은 신뢰성 프로그램의 302 Task의 필수 업무로 정의되어 있다[2,3]. 또한, 방위사업관리 규정에도 신뢰성 성장관리 업무가 포함되어 있다[4].

신뢰성 성장관리의 평가 방법은 현재 시스템 구성의 신뢰성에 대한 정확한 평가가 제공 가능하다. 평가를 통해 계획된 값과 비교하여 프로그램이 계획대로 진행되고 있는지 여부를 알 수 있다. 진도가 제대로 진행되지 않으면, 새로운 전략을 개발해야 한다. 이러한 전략으로는 식별된 문제 영역에서 자원의 재할당, 일정 조정 또는 요구 사항의 유효성에 대한 재검토가 포함된다. 이를 기반으로 현실적인 설계를 근간으로 한 신뢰성 성장 시험 수행이 반드시 필요하다. 시험을 통해 발견된 고장 원인을 제거하여 수정조치활동을 수행함으로써 신뢰성이 점진적으로 개선될 수 있다.

수명주기비용에 있어서 신뢰성은 약 60 % 정도의 중요한 핵심지표로 제시하고 있다[5]. 무기체계별 운용유지비용은 Fig. 1과 같이 운용유지단계에서 60~80 % 이상을 차지하고 있다[6]. 따라서, 체계개발단계에서 결정된 신뢰성 값 기반으로 운용유지단계에 적용되기 때문에 특히, 체계개발단계에서 신뢰성 성장 관리 활동을 통해 신뢰성을 관리해야 한다.

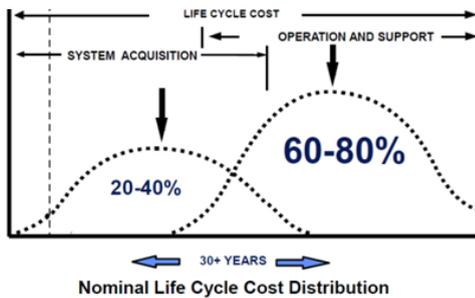


Fig. 1. Life Cycle Cost Distribution[6]

기존 연구사례를 살펴보면, Lee et al.[7]는 기동장비의 개발시험 단계에서의 시험 데이터로 신뢰성 성장 값을 추정하였고, Kim et al.[8]은 신뢰도 예측 값 기반의 감시체계의 신뢰성 성장 분석을 수행하였다. Chung et al.[9]은 K 계열 체계의 필드데이터를 활용하여 신뢰성 성장 값을 추정하였고, Lee et al.[10]는 KA-1 항공기의

운용 데이터로 신뢰성 성장 모델을 활용한 신뢰성 성장 분석을 수행하였다. Jo[11]는 특정 무기체계의 장비 특성을 고려한 시험결과에 따라 신뢰성 성장 분석을 수행하였다. Seo et al.[12]는 무기체계의 연속형 시스템에 대한 신뢰성 성장관리 시험 설계방안에 대해 제시하였다.

위 연구 사례들은 신뢰성 성장 시험데이터를 활용한 결과만을 제시하고 있다. 신뢰성 목표 값을 달성하지 못할 때의 시험 대안은 없다. 프로젝트 수행 시 시스템의 신뢰성이 매우 큰 영향을 주지만, 신뢰성 성장 시험을 수행하는 프로젝트는 거의 없는 실정이다. 특히, 막대한 인명 피해 및 재산 손실 발생 가능성이 높은 원샷 시스템은 반드시 신뢰성 성장 시험이 필요하다.

원샷 시스템이란 한 번 사용되어 소모되는 시스템을 의미한다. 시스템이 운용되어 성공 또는 실패의 수행 결과를 도출하는 유도탄과 같은 시스템을 원샷 시스템이라고 한다[13]. 원샷 시스템의 잠재 손실을 최소화 할 수 있도록 신뢰성 성장 시험의 구체적인 방안이 마련되어야 한다. 국내의 경우, 시험 시료 수 및 개발 기간의 제약사항으로 인하여 신뢰성 성장 시험이 보편적으로 적용되지 못하고 있는 실정이다. 또한, 발사시험 수량이 상대적으로 적어 시험 결과분석이 쉽지 않다. 이에 따라, 신뢰성 성장 시험 결과에 대한 대안분석을 통해 실제 가능한 발사 수량 및 일정을 고려하여 적용해야 한다.

본 논문은 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 절차를 제시한 후 각각의 세부 활동을 기술한다. 제안한 절차에 따라 사례분석을 수행하여 시험결과를 분석한다. 또한, 대안분석을 통해 향후 수행해야할 신뢰성 성장 시험 설계 대안을 제시한다.

2. 본론

2.1 이산형 데이터 유형의 신뢰성 성장 모델

이산형 데이터는 시험 결과가 성공 또는 실패의 두 가지 결과로 도출되는 데이터이다. 유도탄처럼 한번 발사되면 성공 또는 실패의 속성 데이터를 획득 가능한 데이터이다. 이산형 데이터의 유형은 Sequential, Sequential with Mode, Grouped per Configuration 및 Mixed Data로 구분된다. 이에 따른 이산형 데이터를 활용할 수 있는 모델은 Table 1과 같이 Lloyd Lipow, Logistic, Standard Gompertz, Modified Gompertz 및 Crow-AMSAA 모델이 있다[14].

Table 1. Reliability Growth Model for Discrete Data Type

Data	Data Type	Analysis Model
Discrete	·Sequential	·Crow-AMSAA
	·Sequential with Mode	·Standard Gompertz
	·Grouped per Configuration	·Lloyd Lipow
	·Mixed	·Modified Gompertz
		·Logistic

2.1.1 이산형 데이터의 유형

2.1.1.1 Sequential Data

순차적 데이터는 각각에 대해 단일 시험이 수행되는 원샷 시스템에 사용된다. 각 시험에 대한 결과(성공/실패)만 기록된다. 각 시험 후에 시스템을 검사한 후 다음 시험이 시작되기 전에 수정조치가 적용되는 데이터이다.

2.1.1.2 Sequential with Mode Data

고장모드를 포함한 순차적 데이터는 단일 시험이 수행되는 원샷 시스템에 사용된다. 데이터 유형은 순차적 데이터 유형과 동일하지만 각 고장의 원인이 되는 고장모드를 기록하기 위한 고장모드 열이 추가된다. 이렇게 하면 수정조치가 적용된 후 고장모드의 재발가능성을 추적할 수 있다.

2.1.1.3 Grouped per Configuration Data

형상에 따른 그룹 데이터는 각 설계 형상에 대해 여러 번의 시험을 수행하는 원샷 시스템에 사용된다. 동일한 형상의 5개의 신뢰성 성장 시험을 수행하는 것은 5번 시도하는 것으로 간주한다. 각 형상별 발사횟수와 고장횟수가 모두 기록되는 데이터이다.

2.1.1.4 Mixed Data

혼합 데이터는 원샷 시스템이 설계 단계에 한 번만 시험하다가 다른 단계에서 여러 번 시험하는 경우에 사용된다. 각 시험단계별 발사횟수와 고장횟수가 모두 기록되는 데이터이다. 이러한 데이터는 설계 단계보다 이후 단계에서 시험이 많은 경우에 적용 가능하다.

2.1.2 이산형 데이터의 신뢰성 성장 모델

2.1.2.1 CROW-AMSAA Model

AMSAA 모델은 높은 신뢰도 및 발사시험이 많은 경우일 때 적용 가능한 모델이다. AMSAA 모델의 순간 평균 고장시간(m)은 시험 종료 시점의 현재 형상에서 시스템의 입증된 평균고장시간을 의미한다.

2.1.2.2 Standard Gompertz Model

Standard Gompertz 모델은 여러 단계 및 기간에 걸쳐 신뢰성 데이터를 처리할 때 자주 사용된다. 데이터 집합이 부드러운 곡선을 따를 때 가장 적합한 모델이다. 매개변수 a, b, c를 가진 3모수를 통해 데이터 점을 가능한 최상의 선을 적합시킬 수 있다.

2.1.2.3 Lloyd Lipow Model

Lloyd Lipow 모델은 시험 프로그램이 N단계로 진행되는 상황을 고려하는 모델이다. 각 단계는 시험 중인 항목의 특정 횟수의 시행으로 구성되며, 데이터는 성공 또는 실패로 기록된다. 주어진 시험 단계의 모든 시험에는 유사한 항목이 포함된다. 각 시험 단계의 결과는 다음 단계에서 추가 시험을 위해 항목을 개선하는 데 사용한다.

2.1.2.4 Logistic Model

Logistic 모델은 성공/실패, 승/패, 삶/죽음 또는 건강/질병과 같은 특정 사건의 확률을 모형화하는데 사용된다. 이미지에서 감지되는 각 객체에는 0과 1사이의 확률이 할당된다.

2.1.2.5 Modified Gompertz Model

S자형 추이를 가진 신뢰성 성장 데이터를 Logistic 및 Standard Gompertz 모델로 정확하게 설명을 못할 때 적용되는 모델이다. 위 두 모델은 변곡점에서 신뢰도 값이 고정되어 있기 때문에 S자형 신뢰성 성장 곡선을 따르는 몇 개의 신뢰성 성장 데이터 집합만 적합할 때가 있다. 따라서, 수직좌표의 이동을 적용하여 Gompertz 곡선을 수정한 S자형 추이를 적합시킬 때 유연한 모델이다.

2.2 신뢰성 성장 시험 설계 절차 제안

기존 신뢰성 성장 시험 절차는 계획된 신뢰성 값 대비 추정된 신뢰성 값과 비교하여 계획된 신뢰성 목표 값에 충족하지 못하면, 설계 변경을 통해 시험을 재수행한다는 간략한 프로세스만을 언급하고 있다[1]. 이는 구체적인 신뢰성 성장 시험 설계 방안을 수립하는데 한계가 있기 때문에 본 논문에서는 실제 적용 가능한 신뢰성 성장 시험 설계 방안을 제안한다. 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 평가를 위해서는 시험결과를 Success 또는 Failure로 제시하게 된다. 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 절차 수립 시 고려해야 할 사항은 아래와 같다.

첫째, 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 결과 추정 시 최소 3건 이상의 시험데이터가 필요하다.

둘째, 발사시험 실패 시 고장모드에 대한 수정조치는 즉시 수행한다.

셋째, 신뢰성 성장 시험 종료시점에서 신뢰성 목표 값에 미충족되는 경우가 발생할 수 있다.

6-1) 신뢰성 목표 값에 시험 결과가 만족하면, 신뢰성 성장 시험을 종료한다.

6-2) 신뢰성 목표 값에 시험 결과가 만족하지 않으면, 대안분석을 수행한다.

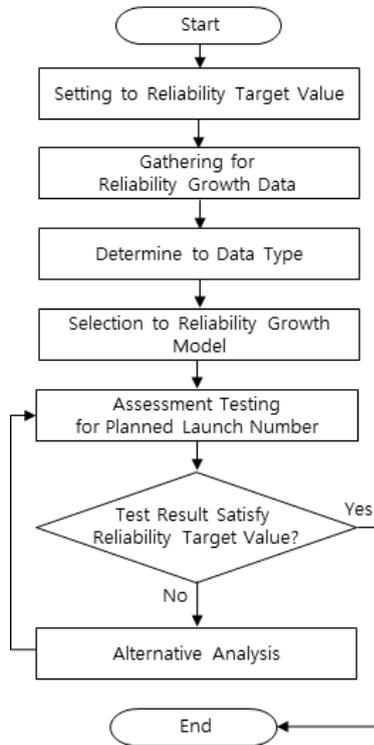


Fig. 2. Proposed Process of Reliability Growth Test for One-shot System

따라서, 위 고려사항을 반영하여 원샷 시스템의 신뢰성 성장을 위한 시험 설계 절차를 Fig. 2와 같이 제시한다. 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계에 대한 제시한 절차의 각각의 활동은 다음과 같다.

- 1단계: 원샷 시스템의 신뢰성 목표 값을 설정한다.
- 2단계: 신뢰성 성장 데이터를 수집한다.
- 3단계: 신뢰성 성장 시험을 위한 데이터 유형을 결정한다.
- 4단계: 데이터 유형에 따른 신뢰성 성장 모델을 선정한다.
- 5단계: 계획한 시험발수에 대한 신뢰성 성장 시험을 평가한다.
- 6단계: 신뢰성 목표 값에 시험 결과 만족여부를 확인한다.

2.3 사례 분석

2.3.1 분석 대상

OOO 원샷 시스템에 대하여 신뢰성 성장 시험 사례분석을 수행하였다. 신뢰성 성장 시험을 수행하기 위해서 신뢰성 성장 데이터가 확보 가능한 OOO 원샷 시스템을 분석 대상장비로 선정하였다. 단, 보안 규정상 OOO 원샷 시스템으로 기술한다.

2.3.2 신뢰성 목표 값 설정

신뢰성 목표 값 설정은 시스템에 대하여 신뢰도, 고장률 등의 신뢰성 척도 및 정량적인 값을 설정하는 것이다. OOO 원샷 시스템의 운용요구서의 신뢰성 목표 값은 Reliability 90 % 이상이다.

2.3.3 신뢰성 성장 데이터 수집

Table 2는 OOO 원샷 시스템의 시험 발수 13발에 대한 신뢰성 성장 시험 결과이다. Launch Number는 발사 순서이며, 총 13발이 발사되었음을 의미한다. Result가 성공일 때는 Success로, 실패일 때는 Failure로 표기하였다. 고장모드에 따른 발사시험의 결과를 정리한 것으로 Failure에 대해서는 고장모드와 연계시켰다. 단, 실패의 종류가 다를 때는 고장모드를 Failure Mode

Table 2. Results of Launch Test for OOO One-shot System with Failure Mode

Launch Number	Result	Failure Mode
1	Failure	Failure Mode 1
2	Success	
3	Failure	Failure Mode 2
4	Success	
5	Failure	Failure Mode 3
6	Failure	Failure Mode 2
7	Success	
8	Success	
9	Success	
10	Failure	Failure Mode 4
11	Success	
12	Success	
13	Success	

Number의 형식으로 표기하였다. Failure Mode는 4가지 유형이었으며, 총 고장 횟수는 5회이다. 특히, 6번째 발사시험은 3번째 발사시험과 동일한 고장 형태를 갖고 있었다. 따라서, 동일한 고장모드의 고장이 반복되더라도 각 고장모드는 동일하게 표기하였다.

2.3.4 데이터 유형 결정

OOO 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 데이터는 이산형 데이터이다. Table 2의 신뢰성 성장 시험 결과에 고장모드가 동일한 형태가 있기 때문에 데이터 유형은 Discrete Data의 Sequential with Mode를 선정하였다.

2.3.5 신뢰성 성장 모델 선정

이산형 데이터 유형에 따른 시험전략을 ‘시험-수정조치-시험’을 수행하는 가장 일반적인 Standard Gompertz 모델을 선정하였으며, Eq. (1)과 같다.

$$R = a \cdot b^{c^T} \quad (1)$$

where :

$$0 < a \leq 1, 0 < b < 1, 0 < c < 1, T > 0$$

a : the upper limit that the reliability approaches asymptotically as $T \rightarrow \infty$, or the maximum reliability that can be attained

ab : the initial reliability at $T=0$

c : the growth pattern indicator

T : the launch number or stage number

2.3.6 시험 결과 분석

OOO 원샷 시스템의 시험발수는 총 13발이며, 13번 발사 중에 5번의 실패가 있었다. 5번 실패 중에 같은 실패는 2번이 발생하여 고장 모드는 4가지 유형으로 분류되었다.

Table 2에 따른 결과를 RGA® SW에 발사순서에 따른 Success/Failure 및 Failure Mode를 Fig. 3과 같이 입력하였다. Success/Failure 항목에 발사시험이 성공일 때는 Success(S)로, 실패일 때는 Failure(F)로 입력하였다. Failure Mode 항목에 첫 번째 고장이 발생했을 때 FM1으로 입력하였다. 두 번째 고장이 발생했을 때는 FM2로 입력하였다. FM4는 네 번째 고장이 발생했을 때인데, 고장모드가 두 번째 고장이 발생했을 때와 동일하여 FM2로 입력하였다. 분석 시 신뢰 수준(Confidence Level)은 90 %로 설정하였다.

Success/Failure	Failure Mode	Comments
1	F	FM1
2	S	
3	F	FM2
4	S	
5	F	FM3
6	F	FM2
7	S	
8	S	
9	S	
10	F	FM4
11	S	
12	S	
13	S	

Fig. 3. Input Value of Reliability Growth Test for OOO One-shot System

RGA® SW를 활용하여 발사순서에 따른 신뢰성 성장 추이 곡선은 Fig. 4와 같이 분석되었다. Reliability Points는 입력데이터를 그래프 상에 표기한 Plot이며, Reliability Line은 Standard Gompertz 모델에 따라 산출되는 신뢰성 성장 곡선이다. Termination Line은 마지막 발사횟수를 의미한다.

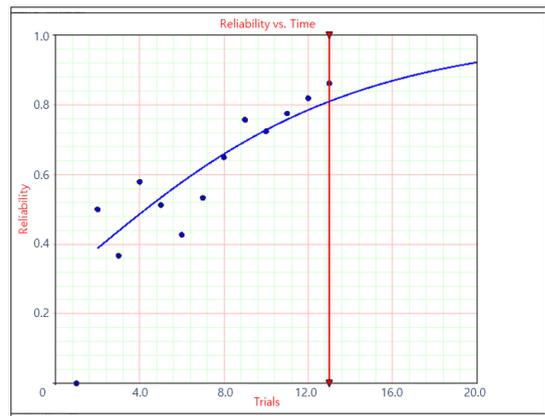


Fig. 4. Reliability Curve for OOO One-shot System

신뢰성 성장 시험동안, 고장이 분석되고 해당 특정 고장모드에 대한 수정조치가 수행되면 재발 가능성이 감소된다. 이러한 이유로 후속 속성 데이터의 경우, 수정조치가 이미 구현된 고장 값을 총 고장 수에서 빼야 한다. 이에 따라, 고장 확률 f는 수정조치 수행 후 성공한 시험횟수에 근거하여 고장 확률에 대한 신뢰 수준을 선정할 수 있다. 고장 확률은 Eq. (2)와 같다.

$$f = 1 - (1 - CL)^{\frac{1}{S_n}} \quad (2)$$

where :

CL : the confidence level

S_n : the number of successful tests after the first success following the corrective action

수정조치를 수행한 후 한 번의 성공적인 시험($S_n=1$)이면, 90 % 신뢰 수준을 기반으로 한 0.9의 고장 값이 부여된다. 두 번의 성공적인 시험($S_n=2$)이면, 0.684의 고장 값이 부여된다. 이산형 데이터가 발사시험 모드와 순차적일 때 고장이 차감되는 방식이다.

이에 따라, 위의 내용을 반영한 결과에 대한 해석을 상세히 하기 위하여 Table 3과 같이 정리하였다. 설정된 신뢰 수준 0.9 기반으로 F1~F5의 고장 확률 f 를 산출하면 다음과 같다.

예를 들어, Launch Number 3 및 F1의 고장 확률은

$$f_{1/3} = 1 - (1 - 0.9)^{\frac{1}{1}} = 0.900$$

Launch Number 4 및 F1의 고장 확률은

$$f_{1/4} = 1 - (1 - 0.9)^{\frac{1}{2}} = 0.684$$

⋮

Launch Number 13 및 F1의 고장 확률은

$$f_{1/13} = 1 - (1 - 0.9)^{\frac{1}{11}} = 0.189$$

으로 산출되어진다.

Sum of Failures(Sum of F)는 발사순서에 따른 F1~F5의 고장 확률을 더한 값이다. 따라서, 열 번째 고장 확률 값은 2.759가 되며, 열 세번째 고장 확률 값은 1.790이 산출되었다.

Table 3. Sum of Failures by Launch Test for OOO One-shot System

Launch Number	Result/ Mode	F1	F2	F3	F4	F5	Sum of F
1	FM1	1.000					1.000
2	S	1.000					1.000
3	FM2	0.900	1.000				1.900
4	S	0.684	1.000				1.684
5	FM3	0.536	0.900	1.000			2.436
6	FM2	0.438	1.000	1.000	1.000		3.438
7	S	0.369	1.000	0.900	1.000		3.269
8	S	0.319	0.900	0.684	0.900		2.802
9	S	0.280	0.684	0.536	0.684		2.184
10	FM4	0.250	0.536	0.438	0.536	1.000	2.759
11	S	0.226	0.438	0.369	0.438	1.000	2.470
12	S	0.206	0.369	0.319	0.369	0.900	2.162
13	S	0.189	0.319	0.280	0.319	0.684	1.790

한편, 각 발사에서의 신뢰성은 고장의 합에 의해서 산출되며, Eq. (3)과 같다.

$$R = [1 - (\frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n})] \times 100 \tag{3}$$

where :

f_i : i-th the probability of failure

n : the launch number

예를 들어, Launch Number 10에서의 신뢰성은

$$\begin{aligned} R &= [1 - (\frac{\sum_{i=1}^{10} f_i}{10})] \times 100 \\ &= [1 - (\frac{2.759}{10})] \times 100 = 72.41 \end{aligned}$$

Launch Number 13에서의 신뢰성은

$$\begin{aligned} R &= [1 - (\frac{\sum_{i=1}^{13} f_i}{13})] \times 100 \\ &= [1 - (\frac{1.790}{13})] \times 100 = 86.23 \end{aligned}$$

으로 산출되어진다.

따라서, 신뢰 수준 90 %에 대한 신뢰성 값은 Table 4와 같다. 13발 발사에 대한 성공/실패에 따른 고장 확률 값 기반으로 신뢰성 값이 산출된 결과이다. 하지만, 마지막 13발 발사 시점에서는 86.23 %로 신뢰성 목표 값 90 % 이상을 만족하지 못하고 있다.

Table 4. Probability of Reliability for OOO One-shot System

Launch Number	Sum of Failures	Reliability(%)
1	1.000	0
2	1.000	50.00
3	1.900	36.67
4	1.684	57.91
5	2.436	51.28
6	3.438	42.71
7	3.269	53.30
8	2.802	64.97
9	2.184	75.74
10	2.759	72.41
11	2.470	77.54
12	2.162	81.98
13	1.790	86.23

2.3.7 대안 분석

신뢰성 목표 값에 시험 결과 값이 만족하지 않았기 때문에 대안분석을 수행하였다. 기존 결과에 추가 발사시험 발수를 선정하기 위하여 누적 발사 실패를 0~2번까지 발생한다고 가정하면, Table 5와 같이 대안 분석의 결과를 도출할 수 있다.

Table 5. Required for Launch quantity of Additional Launch Test

Accumulated Number of Failures	Required Test Number of Additional Launch	Reliability(%)
0	15	91.16
1	18	90.83
2	20	90.28

Table 6. Sum of Failures & Reliability for Launch Test with Additional no Failure

No.	Result	F1	F2	F3	F4	F5	Sum of F	Reliability (%)
1	FM1	1.000					1.000	0
2	S	1.000					1.000	50.00
3	FM2	0.900	1.000				1.900	36.67
⋮								
11	S	0.226	0.438	0.369	0.438	1.000	2.470	77.54
12	S	0.206	0.369	0.319	0.369	0.900	2.162	81.98
13	S	0.189	0.319	0.280	0.319	0.684	1.790	86.23
14	S	0.175	0.280	0.250	0.280	0.536	1.521	89.13
15	S	0.162	0.250	0.226	0.250	0.438	1.326	91.16

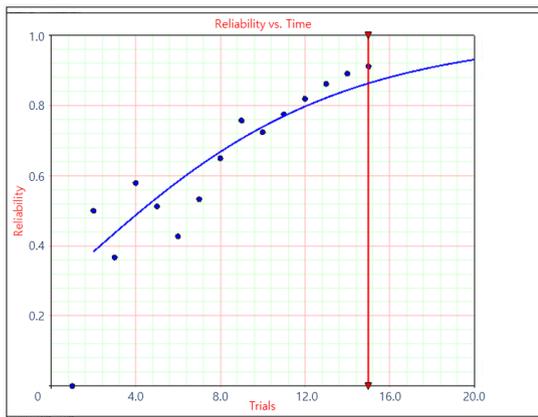


Fig. 5. Reliability Curve for OOO One-shot System with Additional no Failure

Table 6은 13발 발사시험 이후 추가 발사 실패가 없을 경우의 고장 확률 값 및 신뢰성 값이다. 분석 결과, 추가로 발사시험 실패 없이 2발을 발사시험에 성공하게 되면, 신뢰성(R)은 91.16 %로 만족하게 되어 시험을 종료할 수 있다. Fig. 5는 추가 실패 없이 신뢰성 목표 값을 만족할 수 있는 분석 결과를 도시한 그래프이다.

Table 7은 13발 발사시험 이후 추가 발사 1발이 실패할 경우의 고장 확률 값 및 신뢰성 값이다. 분석 결과, 발사시험 중 1발(F6)이 실패하고 난 후 이후 성공할 경우는 추가로 5발이 소요되는 것으로 분석되었다. 18발에 대한 발사시험 종료시점에서의 신뢰성(R)은 90.83 %이다. Fig. 6은 추가 1발 실패에 대한 신뢰성 목표 값을 만족할 수 있는 분석 결과를 도시한 그래프이다.

Table 7. Sum of Failures & Reliability for Launch Test with Additional One Failure

No.	Result	F1	F2	F3	F4	F5	F6	Sum of F	Reliability (%)
1	FM1	1.000						1.000	0
2	S	1.000						1.000	50.00
3	FM2	0.900	1.000					1.900	36.67
⋮									
11	S	0.226	0.438	0.369	0.438	1.000		2.470	77.54
12	S	0.206	0.369	0.319	0.369	0.900		2.162	81.98
13	S	0.189	0.319	0.280	0.319	0.684		1.790	86.23
14	S	0.175	0.280	0.250	0.280	0.536		1.521	89.13
15	FM5	0.162	0.250	0.226	0.250	0.438	1.000	2.326	84.49
16	S	0.152	0.226	0.206	0.226	0.369	1.000	2.178	86.39
17	S	0.142	0.206	0.189	0.206	0.319	0.900	1.961	88.46
18	S	0.134	0.189	0.175	0.189	0.280	0.684	1.650	90.83

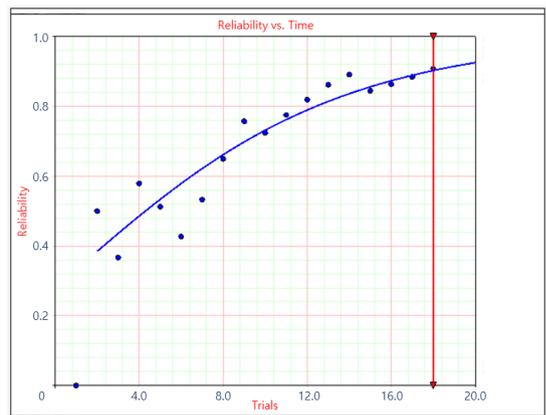


Fig. 6. Reliability Curve for OOO One-shot System with Additional One Failure

Table 8은 13발 발사시험 이후 추가 발사 2발이 실패할 경우의 고장 확률 값 및 신뢰성 값이다. 분석 결과, 발사시험 중 2발(F6, F7)이 실패하고 난 후, 이후 성공할 경우는 추가로 7발이 소요되는 것으로 분석되었다. 20발에 대한 발사시험 종료시점에서의 신뢰성(R)은 90.28 %이다. Fig. 7은 추가 2발 실패에 대한 신뢰성 목표 값을 만족할 수 있는 분석 결과를 도시한 그래프이다.

Table 8. Sum of Failures & Reliability for Launch Test with Additional Two Failures

No.	Result	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	Sum of F	Reliability (%)
1	FM1	1.000							1.000	0
2	S	1.000							1.000	50.00
3	FM2	0.900	1.000						1.900	36.67
⋮										
11	S	0.226	0.438	0.369	0.438	1.000			2.470	77.54
12	S	0.206	0.369	0.319	0.369	0.900			2.162	81.98
13	S	0.189	0.319	0.280	0.319	0.684			1.790	86.23
14	S	0.175	0.280	0.250	0.280	0.536			1.521	89.13
15	FM5	0.162	0.250	0.226	0.250	0.438	1.000		2.326	84.49
16	S	0.152	0.226	0.206	0.226	0.369	1.000		2.178	86.39
17	FM6	0.142	0.206	0.189	0.206	0.319	0.900	1.000	2.961	82.58
18	S	0.134	0.189	0.175	0.189	0.280	0.684	1.000	2.650	85.28
19	S	0.127	0.175	0.162	0.175	0.250	0.536	0.900	2.324	87.77
20	S	0.120	0.162	0.152	0.162	0.226	0.438	0.684	1.944	90.28

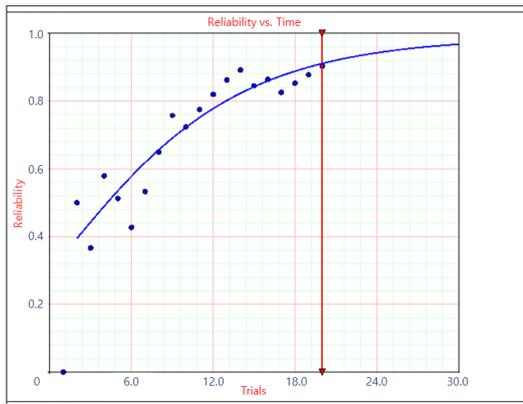


Fig. 7. Reliability Curve for OOO One-shot System with Additional Two Failure

3. 결론

신뢰성 성장 시험의 궁극적인 목표는 최종 신뢰성을 입증하여 시스템을 개발하는 것이다. 단, 주어진 일정과 예산 내에서 신뢰성을 달성해야 한다.

본 논문은 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계방안을 제시하였다. 제안한 신뢰성 성장 시험 설계 절차에 따

른 OOO 원샷 시스템의 사례분석을 수행하였다. 수집된 신뢰성 성장 시험 데이터는 고장모드가 동일한 형태가 존재하기 때문에 데이터 유형을 이산형 데이터의 고장모드를 포함하는 순차적 데이터 유형으로 선정하였다. 이때, 신뢰성 성장 모델은 시험-수정조치-시험을 수행하는 가장 일반적으로 적용되는 Standard Gompertz 모델을 선정하여 데이터를 분석하였다. 발사시험 13발에 대한 신뢰성 성장 시험 분석 결과는 신뢰성 목표 값 90 % 이상 대비 86.23 %의 값이 산출되어 만족되지 못하는 결과이었다. 따라서, 추가 발사시험이 수행되어야 함에 따라 대안분석을 수행하였다. 추가 발사시험이 실패 없이 진행되는 경우는 추가 2발 발사시험이 필요하였으며, 15발 발사종료시점의 신뢰성 값은 91.16 %이었다. 추가 발사시험 중 1발이 실패하는 경우는 추가 5발 발사시험이 필요하였으며, 18발 발사종료시점의 신뢰성 값은 90.83 %이었다. 추가 발사시험 중 2발이 실패하는 경우는 추가 7발 발사시험이 필요하였으며, 20발 발사종료시점의 신뢰성 값은 90.28 %이었다. 따라서, 본 연구인 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 방안을 통하여 발사시험 수량 및 일정을 결정하는 기준으로 활용할 수 있다.

본 논문에서 제시한 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 방안은 이해관계자가 신뢰성 성장 시험 수행 시 자원 재할당을 하는데 유용할 것으로 사료된다. 본 연구는 모든 원샷 시스템의 신뢰성 성장 시험 설계 수립 시에 활용 가능하다.

References

- [1] MIL HDBK 189C, Reliability Growth Management, Depart of Defense, pp. 2-10, 2011.
- [2] MIL STD 785B, Reliability Program for System & Equipment Development & Production, Task Section 302 ; Reliability Development/Growth Test(RDGT) Program, Department of Defense, pp. 1-2, 1980.
- [3] Supportability Toolkit, Reliability Information Analysis Center, pp. 186-187, 2005.
- [4] Defense Project Management Regulation, Defense Acquisition Program Administration, p. 50, 2021.
- [5] JCIDS Manual, Manual for the Operation of the Joint Capabilities Integration and Development System, pp. B-A 2-3, 2012.
- [6] Defense Acquisition University, DoD Life Cycle Management and Product Support Manager Rapid Deployment Training, pp. 10-11, 2010.
- [7] Y. J. Lee, G. B. Bae, Y. M. Heo, J. H. Seo, S. B. Kim,

J. K. Choi, W. J. Park, "Reliability Growth Management for Armed Vehicle: Launcher System Case Study", *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol. 45, No. 4, pp. 981-994, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2017.45.4.981>

- [8] Kim, S. B., Park, W. J., You, J. W., Lee, J. K., Yong, H. Y., "Reliability Prediction Based Reliability Growth Management : Case Study of Surveillance System", *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 47, No.1 pp. 187-198, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.1.187>
- [9] I. H. Chung, H. Y. Lee, Y. I. Park, "Reliability Evaluation of Weapon System using Field Data : Focusing on Case Study of K-series Weapon System", *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol. 40, No. 3, pp. 278-285, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2012.40.3.278>
- [10] Y. E. Lee, G. Y. Kim, G. H. Lee, Y. H. Kim, Y. M. Jung, "Reliability Growth Analysis for KA-1 Aircraft based on Duane and Crow-AMSAA Model", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference*, pp. 871-874, 2010.
- [11] B. R. Jo, "A case study on reliability growth analysis for a missile system composed of all up round missile and launcher", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 2, pp. 329-335, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.2.329>
- [12] Y. W. Seo, J. H. Yoon, S. S. Lee, C. S. Um, "A Method of Reliability Growth Management Test Design for Continuous System", *Journal of the Korean Society of Systems Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 87-96, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.14248/JKOSSE.2020.16.2.087>
- [13] DoD Guide for achieving Reliability, Availability & Maintainability, Department of Defense, Chapter 3 Understand and Document User Needs and Constraints, p. 3, 2005.
- [14] MIL Reliability Growth Analysis 11 User's Guide, Reliasoft, HBM Prensncia INC, pp. 164-168, 2017.

서 양 우(Yang-Woo Seo) [정회원]



- 1998년 2월 : 홍익대학교 전기공학과 (공학학사)
- 2014년 8월 : 아주대학교 IT융합공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 아주대학교 시스템공학과 (공학박사)
- 1998년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야>

RAMS, 시스템 엔지니어링, 데이터 분석

김 희 욱(Hee-Wook Kim) [정회원]



- 2010년 2월 : 부산대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2010년 9월 ~ 2012년 12월 : 한국철도기술연구원
- 2013년 1월 ~ 2018년 8월 : LIG넥스원 선임연구원
- 2018년 8월 ~ 2019년 10월 : 네모시스(주) 책임연구원
- 2019년 10월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

RAMS, 모델링&시뮬레이션

김 소 정(So-Jung Kim) [정회원]



- 2018년 2월 : 아주대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2020년 2월 : 아주대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 연구원

<관심분야>

신뢰성, 품질

김 용 근(Yong-Geun Kim) [정회원]



- 2020년 2월 : 한양대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 연구원

<관심분야>

신뢰성, 데이터분석