

일회용품의 신뢰성분석 방안

백재욱

한국방송통신대학교 통계·데이터학과

Reliability analysis methods to one-shot device

Jaiwook Baik

Department of Statistics·Data Science, Korea National Open University

요약 우리 주위를 살펴보면 한 번 사용하고 버리는 일회용품이 많다. 폭죽이나 탄약과 같은 일회용품이 대표적인데 이들 일회용품은 제조 후 한 동안 저장되어 있다가 필요한 때 사용하고 나면 폐기처분하게 된다. 하지만 이런 일회용품은 일반 운영장비와 달리 신뢰성평가가 제대로 이루어지지 못했다. 이에 본 연구에서는 일회용품 중에서 탄약에 대한 저장탄약신뢰성프로그램을 통해 탄약의 경우 신뢰성 확보를 위해 정부에서 어떤 일을 하는지 먼저 살펴본다. 이어서 통계분석적인 측면에서 탄약과 같은 일회용품에 대한 신뢰성분석 방안으로 어떤 것이 있는지 알아본다. 구체적으로 통계학에서 로트의 품질수준을 파악하는 샘플링검사를 활용하여 일정한 시기에 생산된 탄약에 대한 신뢰성의 수준을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 KS Q 0001인 계수규준형 1회 샘플링검사표를 이용할 수 있음으로 보여준다. 다음으로 탄약의 저장신뢰도를 파악할 수 있는 방법으로 비모수적인 방법과 모수적인 방법을 소개한다. 비모수적인 방법중에서 특히 Kaplan-Meier 방법은 중도중단데이터가 포함된 경우에도 활용될 수 있다. 마지막으로 모수적인 방법 중에는 신뢰성분석에 많이 활용되는 와이블분포가 탄약의 저장신뢰도를 파악하는 데에도 활용될 수 있다.

주제어 일회용품, 신뢰성분석, 저장탄약신뢰성프로그램, 비모수적 방법, 모수적 방법

Abstract There are many one-shot devices that are used once and thrown away. One-shot devices such as firecrackers and ammunition are typical, and they are stored for a while after manufacture and then disposed of after use when necessary. However, unlike general operating systems, these one-shot devices have not been properly evaluated. This study first examines what the government does to secure reliability in the case of ammunition through ammunition stockpile reliability program. Next, in terms of statistical analysis, we show what the reliability analysis methods are for one-shot devices such as ammunition. Specifically, we show that it is possible to know the level of reliability if sampling inspection plan such as KS Q 0001 which is acceptance sampling plan by attributes is used. Next, non-parametric and parametric methods are introduced as ways to determine the storage reliability of ammunition. Among non-parametric methods, Kaplan-Meier method can be used since it can also handle censored data. Among parametric methods, Weibull distribution can be used to determine the storage reliability of ammunition.

Key Words One-shot device, Reliability analysis, Ammunition stockpile reliability program, Non-parametric method, Parametric method

Received 07 Oct 2022, Revised 18 Oct 2022

Accepted 21 Oct 2022

Corresponding Author: Jaiwook Baik
(Korea National Open University)

Email: jbaik@knou.ac.kr

ISSN: 2466-1139(Print)

ISSN: 2714-013X(Online)

© Industrial Promotion Institute. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

제품이나 서비스의 신뢰성은 안전성 제고는 물론 고객들에게 양질의 서비스를 제공한다는 측면에서 중요성이 더해가고 있다. 특히 폭죽이나 탄약과 같이 제조된 후 한 동안 보관한 다음 한 번의 사용으로 용도가 폐기되는 경우에는 더욱 그러하다. 탄약은 장기간 저장하여 운영해야 하므로 시간에 따른 신뢰도 저하가 중요한 문제로 대두되고 있다. 이에 선진국은 물론 우리나라에서도 저장탄약신뢰성프로그램(ASRP, Ammunition Stockpile Reliability Program)을 운영하고 있다[1, 2]. 우리나라의 경우 국방기술품질원이 장기간 보관된 탄약에 대한 신뢰성평가를 1999년부터 시행해오고 있으며, 주요 업무는 장기간 저장된 탄약에 대한 비기능 및 기능검사, 저장 안정성 검사 등이며, 이로부터 신뢰성의 변화 추이를 판단하여 탄약에 대한 상태를 일정한 코드의 형식으로 부여하고 있다.

근래까지 군에서 수행한 신뢰성평가는 주로 운영장비(operating system) 위주로 이루어졌지 탄약과 같이 장기간 저장하여 사용하는 one-shot device와 같은 것에 대해서는 많이 이루어지지 못했다[3]. 그 이유는 저장된 탄약은 언제 사용될지 예측이 어렵고, 장기간 저장으로 인한 성능의 저하가 일반 기계부품의 열화에 의한 성능저하와 다른 방향으로 진행되어, 이를 제대로 평가할 방안이 제대로 마련되어 있지 않았기 때문이다.

하지만 근래에는 one-shot device에 대한 연구가 일부 진행되어 왔다. one-shot device가 폭탄과 같이 고가인 경우 표본을 많이 취할 수가 없는데, 이렇게 표본의 크기가 작은 경우 베이저안 기법을 이용하여 신뢰도를 어떻게 추정할 수 있는지 연구가 진행된 바 있다[4]. 한편, 시스템은 단품이외에 병렬계일 수 있다. 따라서 일회용품이 병렬계일 때 신뢰도를 추정할 필요가 있는데, 시스템이 병렬계 중에서 k out of M인 구조인 one-shot device의 경우 신뢰도 추정 또한 연구된 바 있다[5]. 근래에는 제품의 수명주기가 짧아지면서 가속수명시험을 많이 진행하는데, one-shot device의 경우 가속수명시험을 어떻게 진행하고 그 결과 나온 데이터의 분석은 어떻게 하는지 설명한 연구도 있다[6]. one-shot device의 고장모드가 여러 있고, 이들이 서로 종속적일 수 있는데, 이런 경우 Copula 모델을 이용하여 one-shot device의

신뢰성을 추측할 수도 있다[7].

본 연구에서는 one-shot device의 신뢰성평가가 근래에 많이 부각되므로 one-shot device와 관련된 기본적인 개념을 먼저 살펴보고, 이런 device의 신뢰성분석 방법을 통계적인 측면에서 제시하고자 한다. 구체적으로 본 연구의 2절에서는 one-shot device와 관련된 용어를 살펴보면서 저장탄약신뢰성프로그램에 대해 알아보고, 3절에서 one-shot device의 신뢰성분석방법에 대해 알아보고, 4절에서 요약하고자 한다.

2. 저장탄약신뢰성프로그램

이 절에서는 one-shot device와 관련된 여러 가지 용어를 먼저 살펴보면서 저장탄약신뢰성프로그램이 무엇인지 알아보고자 한다. 우선 one-shot device의 대표적인 예인 탄약(ammunition)은 다음과 같이 정의되어 있다[7].

① 탄약은 전투에 사용되는 폭발물, 발사 화약, 신호탄, 점화용 화합물 또는 화생방 물질을 장전한 장치이며 훈련, 의식, 비사격 목적에도 사용할 수 있다.

② 탄약은 인원, 물자 및 시설에 피해를 주기 위하여 추진, 거치, 투척, 투하, 및 기타 방법에 의하여 사용되는 화약, 화학제, 세균 및 방사능 물질을 내포하는 군수품을 말한다.

이런 탄약은 일정한 프로그램에 의해 관리가 되는데, 이것이 바로 저장탄약신뢰성프로그램(ASRP, Ammunition Stockpile Reliability Program)이다. ASRP란 탄약의 소요제기 단계에서부터 저장 및 운영의 총수명주기 동안 저장신뢰성을 확보할 수 있도록 하는 것으로 각 단계별 주체는 다음과 같다.

- ① 체계개발 단계: 국방과학연구소
 - ② 생산 및 배치단계: 기술품질원
 - ③ 저장 및 운용단계: 육군 탄약지원사령부
- ASRP 업무는 다음과 같은 단계를 밟아 수행된다.

- ① 시험 준비: 시험대상 선정 및 시료채취
- ② 시험 실시: 일반검사 및 기능시험(각 군), 비기능검사(기품원), 발사시험(국과연, 기품원) 및 저장분석시험(기품원) 실시

③ 시험결과 분석평가: 계수/계량치 데이터 분석, 통계적 기법에 의한 기능 등급 및 로트 품질수준 설정 그리고 로트별 시험장 성능시험, 저장분석시험, 비기능시험 결과 분석 후 종합등급 결정

④ 후속조치: 상태전환, 정상/개수정비 폐기, 그리고 결과보고서 발간, 배포 등

ASRP 업무 중 주요 요소는 <Table 1>에서와 같으며, 판정은 <Table 2>에서와 같다[8].

<Table 1> ASRP 업무 중 주요 요소

구분	기능		주관기관
일반검사	육안검사 위주 활동		각 군, 기품원
저장 기능 시험	기능시험	발사 및 비발사탄약 성능시험	각 군
	시험장 성능시험	발사탄약 성능시험	기품원
저장분석시험	이화학분석시험 재료시험, 파괴 및 비파괴시험		기품원
약작용 조사분석	약작용 원인규명, 조치		기품원, 각 군
수명평가기법개발	연구개발계획서 반영		개발기관

<Table 2> 탄약상태 판정

종합등급 \ 저장등급	A(계속 저장)		
	C(1년 내 소모)	D(60일 내 폐기)	
I(계속 사용)	A	C, F	H, F
II(사용 제한)	B, C, F	B, C, F	H, F
D(사용불가, 위험)	B, H, F	H, B, F	H, F

* A: 제한 없이 사용 및 불출, B: 조건부 불출, C: 우선 불출, J: 임시불출중지, F: 개수정비, H: 처리대상탄

탄약은 크게 재래식 탄약(소구경탄, 포탄약, 로켓탄 등)과 특수탄약(유도탄, 중로켓 등)의 두 가지로 구분할 수 있다. 재래식탄약은 정비가 수반되지 않는 탄약으로서 신뢰도는 요구시점에서 1회 발사에 대한 신뢰도이며 신뢰도 값은 성공확률로 표현한다. 예를 들어 10년 저장 후 요구신뢰도가 80%라는 것은 10년 저장 후 100발 중 80발 이상 정상적으로 기능을 발휘해야 한다는 것이다. 반면, 특수탄약과 같이 일정기간마다 주기적인 검사를 통해 정비업무를 수행하는 탄약은 일반적 무기체계와 같은 방법으로 운용·저장 및 유지능력을 정량적으로 제시할 수 있으므로 신뢰도는 고장 간 평균시간(MTBF)으로, 가용도는 백분율(%)로, 정비도는 평균수

리시간(MTTR) 및 정비율(MR)로 정량화하여 제시된다.

탄약 중 재래식 탄약은 통상 수리하면서 사용하는 장비와 달리 one shot device로서 비수리기에 해당되므로 부품(component) 수준에서의 분석이 가능하다는 것을 알 수 있다. 하지만 일반 부품이 생산 즉시 시간, 사용량, 사용환경 등에 따른 수명으로 나타낼 수 있는 것과 달리 탄약은 생산 후 한 동안 특정한 저장환경에 저장되어 있다가 정해진 시간에 일부를 샘플링하여 일부 탄약이 선택되고, 이 탄약에 대한 시험결과를 가지고 일정한 근거에 의해 등급이 매겨진다. 이런 저장신뢰성시험프로그램(SRTP, Stockpile Reliability Test Program)은 다음과 같이 정의되어 있다[7].

저장신뢰성시험프로그램은 탄약, 화생방 물자 등 저장조건, 환경 및 기간에 따라 화학성질 및 성능의 변화가 예상되는 품목에 대하여 정상 저장 상태에서 주기적으로 시료를 선정하여 성능저하 상태를 확인하여 계속 저장 가능 여부, 긴급사용, 폐기 등을 결정하기 위한 시험을 말한다.

탄약의 수명에 대한 모델링 기법으로는 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째, 탄약의 수명을 정량적으로 파악할 수 없고 저장기간에 따른 탄약의 불발률(또는 성공률)을 구할 수 있는 경우 공변수(저장환경 등)를 포함하는 모델, 예를 들어 회귀분석과 같은 기법을 활용할 수 있다. 둘째, 탄약의 수명을 정량적인 시간으로 파악할 수 있는 경우 Kaplan-Meier 방법으로 신뢰도(생존확률)를 구할 수 있고, 공변수를 포함하는 경우에는 Cox의 proportional hazard model을 활용할 수 있다.

3. One-shot device의 신뢰성분석방안

3.1 샘플링검사

탄약에 대한 시험 결과 나온 데이터로 수명 또는 RAM 분석을 하기 전에 샘플링된 탄약이 어떤 방법으로 샘플링된 것인지 파악해볼 필요가 있다. 왜냐하면 추출된 샘플이 적절한 방법에 의해 선택되었을 때 본 연구에서 설명하는 분석결과가 의미를 갖기 때문이다.

통계적 사고방식의 발전으로 소비자 및 생산자는 자신의 위치나 요구사항에 맞는 샘플링방법을 고안하게 되었다. 이들은 크게 규준형, 선별형, 조정형 및 연속생산형 검사로 나눈다[9].

① 규준형 샘플링 검사: 생산자는 물론 소비자의 요구 조건을 만족시키는 검사

② 선별형 샘플링 검사: 불합격된 로트는 전수 선별하여 불량품을 모두 제거하는 검사(검사 후 로트의 불량률은 이전보다 낮아짐)

③ 조정형 샘플링 검사: 군수품의 구입에서와 같이 대량의 물품을 연속적으로 구입하는 경우 적용하는 검사(품질이 좋으면 검사를 쉽게 통과시킴)

④ 연속생산형 샘플링 검사: 품질이 좋으면 건너뛰어 하나씩 실시하는 검사

검사횟수에 따라서는 다음과 같이 분류한다.

① 1회 샘플링 검사: 한번 시료를 여럿 뽑아 로트의 합격여부 판정

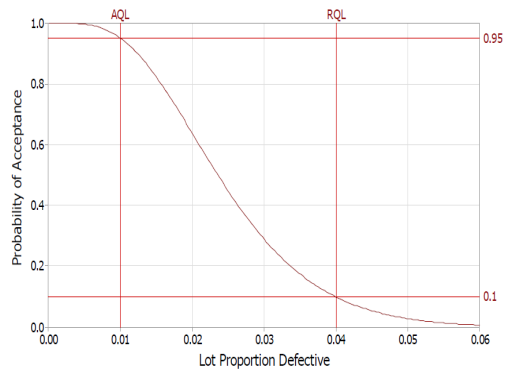
② 2회 샘플링 검사: 최대 두 번 시료를 여럿 뽑아 로트의 합격여부 판정

③ 축차 샘플링 검사: 매회 로트로부터 1개씩의 시료를 채취하여 누적 불량개(부적합품)수를 구한 다음, 이것이 상당히 적으면 로트를 합격시키고, 너무 많으면 불합격시키며, 어중간하면 1개 더 뽑아 검사를 계속하는 샘플링 검사 방식 품질 특성치의 성질에 따라서는 다음과 같이 분류한다.

① 계수형 샘플링 검사: 계수형 데이터에 적용하는 샘플링 검사(계량형 샘플링 검사에 비해 용이함)

② 계량형 샘플링 검사: 계량형 데이터에 적용하는 샘플링 검사(똑같은 수라면 계수형 샘플링 검사 보다 더 많은 정보 얻음)

규준형은 예를 들어 탄약의 경우 불발률이 1%($=p_0$) 정도로 양호한 상태라면 해당 로트를 가능하면 합격(예를 들어 95%의 높은 확률로 합격)시키고, 8%($=p_1(>>p_0)$) 정도로 아주 불량한 상태라면 해당 로트를 가능하면 불합격(예를 들어 10%의 낮은 확률로만 합격)시키고자 하는 경우 검사특성곡선(operating characteristic curve)은 [Figure 1]과 같이 그릴 수 있다.



[Figure 1] 검사특성곡선

AQL: Acceptable Quality Level로 p_0 수준을 말함

RQL: Rejection Quality Level로 $p_1(>>p_0)$ 수준을 말함

(예 1) 계수규준형 1회 샘플링검사표 이용 예

$p_0 = 1\%, \alpha = 0.05, p_1 = 8\%, \beta = 0.1$ 인 경우 계수 규준형 1회 샘플링검사계획을 세워라.

【풀이】

① Table 3의 p_0 행에서 1%에 해당하는 구간을 찾는다.

② Table 3의 p_1 열에서 8%에 해당하는 구간을 찾는다.

③ 열과 행이 만나는 곳으로부터 시료크기 n 과 합격 판정개수 c 를 읽는다. 만약 그 자리에 화살표가 있으면 그 방향으로 따라가서 처음으로 마주치는 칸의 n 과 c 를 읽는다. 이 예에서는 $n = 60, c = 2$ 이다. 따라서 해당 로트로부터 60개의 탄약을 랜덤하게 채취하여 그중 2발 이하가 불량이면 해당 로트를 합격시킨다.

(Table 3) 계수규준형 1회 샘플링검사표(KS Q 0001)

(왼쪽 아래는 n, 오른쪽 위는 c, $\alpha=0.05, \beta=0.10$)

$p_0(\%)$	0.71	0.91	1.13	1.41	1.81	2.25	2.81	3.56	4.51	5.61	7.11	9.01	11.3	14.1	18.1	22.5	28.1	$p_1(\%)$
0.090	0.90	1.12	1.40	1.80	2.24	2.80	3.55	4.50	5.60	7.10	9.00	11.2	14.0	18.0	22.4	28.0	35.5	0.090
0.112	*	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.112
0.113	*	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.113
0.140	*	1	300	1	1	1	1	1	40	1	1	1	1	1	1	1	1	0.140
0.141	*	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.141
0.180	*	500	2	250	1	1	1	1	30	0	1	1	1	1	1	1	1	0.180
0.181	*	400	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.181
0.224	*	400	2	200	1	1	1	1	25	0	1	1	1	1	1	1	1	0.224
0.225	*	3	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.225
0.280	*	500	300	2	1	150	1	1	1	20	0	1	1	1	1	1	1	0.280
0.281	*	400	250	3	2	1	120	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0.281
0.355	*	400	250	3	2	1	120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.355
0.356	*	4	3	2	1	100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.356
0.450	*	500	300	200	2	1	100	1	1	1	15	0	1	1	1	1	1	0.450
0.451	*	4	3	2	1	80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.451
0.560	*	400	250	3	2	1	80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.560
0.561	*	6	4	3	2	1	60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.561
0.710	*	500	300	200	120	2	1	60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.710
0.711	*	6	4	3	2	1	50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.711
0.900	*	400	250	150	100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.900
0.901	*	6	4	3	2	1	40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.901
1.12	*	300	200	120	80	2	1	40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.12
1.13	*	6	4	3	2	1	30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.13
1.40	*	500	10	250	150	100	60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.40
1.41	*	10	6	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.41
1.80	*	400	200	120	80	3	50	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.80
1.81	*	10	6	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.81
2.24	*	300	150	100	60	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.24
2.25	*	250	120	70	30	3	30	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.25
2.80	*	250	120	70	30	3	30	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.80
2.81	*	200	100	60	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.81
3.55	*	100	60	40	25	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3.55
3.56	*	100	60	40	25	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3.56
4.50	*	150	80	50	30	2	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.50
4.51	*	120	60	40	25	2	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.51
5.60	*	100	60	40	25	2	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5.60
5.61	*	100	60	40	25	2	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5.61
7.10	*	100	50	30	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7.10
7.11	*	16	6	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7.11
9.00	*	40	25	16	10	6	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9.00
9.01	*	60	30	20	10	6	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9.01
11.2	*	60	30	20	10	6	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	11.2
$p_0(\%)$	0.71	0.91	1.13	1.41	1.81	2.25	2.81	3.56	4.51	5.61	7.11	9.01	11.3	14.1	18.1	22.5	28.1	$p_1(\%)$
$p_0(\%)$	0.90	1.12	1.40	1.80	2.24	2.80	3.55	4.50	5.60	7.10	9.00	11.2	14.0	18.0	22.4	28.0	35.5	$p_1(\%)$

앞에서는 KS Q 0001[10]을 이용하여 샘플링검사계획을 세웠지만 로트단위로 수입검사가 계속 이루어지는 군수분야에서는 AQL을 보증하기 위해 ISO 2859의 사용이 권고되고 있다(Reliability and Maintainability Assurance Activity Part 1 One-Shot Devices/Systems, 2008). 우리나라에서는 이를 번역한 것으로는 KS Q ISO 2859-1(로트마다의 검사에 대한 AQL 지표형 샘플링 검사 방식), KS Q ISO 2859-3(skip-lot 샘플링검사) 등이 있다.

3.2 탄약의 저장신뢰도

탄약과 같은 one shot device의 특징은 다음과 같다[11].

① 1회 사용 후 재사용이 불가능하며, 수명주기 동안 장기간 저장 또는 대기 상태로 유지됨

② 전차, 전투기 같은 무기체계(이를 one shot device에 견주어 operating device라고 함)가 OMS/MP에 따른 운용(operating, 체계 또는 체계의 하부 구성요소가 전기적 혹은 기계적 스트레스에 노출된 상태) 개념을 분석하여 MTBF나 MTTF로 신뢰성을 평가하지만 one shot device는 비운용(non-operating) 상태(앞의 스트레스가 없는 상태)를 고려하여 저장신뢰성으로 신뢰성을 평가함

③ one shot device는 오랜 동안 저장되며(이때 여러 번 예방점검이 이루어짐) 짧은 시간 동안 운용되어 임무를 수행하거나, 임무를 수행하지 못하고 수명이 지나면 폐기됨(Figure 2 참조)



[Figure 2] 탄약과 같은 one shot device의 운용형태

④ 개개 탄약의 시험결과는 성공 또는 실패로 나타나며(quantal data), 샘플로 선정된 탄약들에 대한 시험결과는 임무성공률(%)로 나타남

⑤ 유도탄과 같은 one shot system은 보통 탄약에 비해 수량이 적고 고가이므로 적은 양의 데이터를 수집할 수밖에 없어 신뢰성분석이 어려움

탄약과 같은 one shot device의 저장신뢰도를 구하는 방법은 다음과 같다.

3.2.1 비모수적(nonparametric) 방법

이 방법은 탄약의 수명에 대한 특정 분포를 가정하지 않고 저장신뢰도를 구하는 방법이다[12, 13].

(1) 비누적법(non-cumulative method)

과거 시험 데이터를 이용하지 않고 현 시점(또는 한 곳)에서 수집한 수명시험 데이터만으로 저장신뢰도를

다음과 같이 추정한다.

$$\hat{R}(t_i) = 1 - \frac{n(t_i)}{m(t_i)}$$

t_i : 수명 시험 데이터 수집 시점
 $n(t_i)$: 실패 샘플수(고장 샘플수)
 $m(t_i)$: 전체 샘플수

(2) 누적법(cumulative method)

과거 시점부터 현 시점까지 확보된(또는 여러 곳의) 데이터가 있는 경우 저장신뢰도는 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{R}(t_i) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^i n(t_j)}{\sum_{j=1}^i m(t_j)}, j = 1, 2, \dots, i$$

(3) 혼합법(mixed method)

혼합법은 비 누적법과 누적법을 혼합하여 저장신뢰도를 추정하는 방법으로, 과거부터 현 시점까지 수집한 데이터와 초기 샘플수(N)를 이용하여 저장신뢰도를 추정한다.

$$\hat{R}(t_i) = 1 - \frac{\hat{p}_i N + n(t_1) + n(t_2) + \dots + n(t_{i-1})}{N}$$

$$\hat{p}_i = \frac{n(t_i)}{m(t_i)}, i = 1, 2, \dots, k$$

(4) Kaplan-Meier 방법

중도중단(censored) 시간이 포함된 경우 신뢰도를 추정할 수 있는 방법으로 다음 절차를 거쳐 신뢰도를 추정한다.

<순서 1> 중도중단시간을 포함한 관측값 t_1, t_2, \dots, t_n 을 작은 것부터 큰 것으로 순차적으로 나열하여 $t_{(1)} < t_{(2)} < \dots < t_{(n)}$ 을 얻는다.

<순서 2> 관측값 $(t_{(1)}, \delta_{(1)}), (t_{(2)}, \delta_{(2)}), \dots, (t_{(n)}, \delta_{(n)})$ 을 재배열한다. 여기에서 $\delta_{(i)}$ 는 다음과 같다.

$$\delta_{(i)} = 1, \quad t_{(i)} \text{가 고장시간인 경우}$$

$$0, \quad \text{가 중도중단시간인 경우}$$

<순서 3> $t_{(i)} \leq t < t_{(i+1)}, i = 0, 1, \dots, n$ 에 대하여 신뢰도 $R(t)$ 는 다음과 같이 계산한다. 여기서 $t_{(0)} = 0, t_{(n+1)} = \infty$ 로 정의한다.

$$R_n(t) = \prod_{l=1}^i \left(\frac{n-l}{n-l+1} \right)^{\delta_{(l)}}$$

3.2.2 모수적 방법(parametric method)

고장확률이 p일 때 m개 중 n개의 실패를 관측할 확률은 이항분포를 활용하면 다음과 같다.

$$p(n) = \binom{m}{n} p^n (1-p)^{m-n}$$

전체 시료 N개를 k단계 (t_1, t_2, \dots, t_k)에 걸쳐서 t_i 시간에 m_i 개를 추출하여 합격(Pass/Fail) 여부를 시험평가한 결과 n_i 개의 고장이 발생하는 경우

$$P(n_i) = \binom{m_i}{n_i} F(t_i)^{n_i} (1-F(t_i))^{m_i-n_i}$$

여기서 $F(t_i)$ 는 one shot device가 t_i 시간까지는 고장 날 누적고장확률이다.

one shot device의 수명이 와이블분포를 따르는 경우 누적고장확률은 다음과 같다[14].

$$F(t_i, \theta) = 1 - e^{-\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta}$$

여기서 α 는 척도모수(scale parameter)이고 β 는 형상모수(shape parameter)이다.

따라서 우도함수(likelihood function)는 다음과 같다.

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^k \binom{m_i}{n_i} [F(t_i, \theta)]^{n_i} [1 - F(t_i, \theta)]^{m_i-n_i}$$

앞에서 정의된 우도함수를 가장 크게 하는 모수의 값을 추정하여 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 라고 하면 시간 t에서의 저장신뢰도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{R}(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\hat{\alpha}}\right)^{\hat{\beta}}\right]$$

4. 요약

어떤 제품이나 서비스든 고객에게 신뢰성 제고는 기업의 경쟁력 측면에서 필수적이다. 그 제품이나 서비스가 한 번 사용하고 버려지는 일회용품의 경우에도 마찬가지이다. 일회용품으로는 폭죽이나 탄약과 같은 것이 대표적인데 이들 일회용품은 제조 후 한 동안 저장되어 있다가 필요한 때 사용하고 나면 폐기처분하게 된다. 그런데 저장기간이 경우에 따라서는 꽤 길어질 수 있다. 그런데 이런 일회용품은 일반 운영장비와 달리 신뢰성 평가가 많이 이루어지지 못했다. 이에 본 연구에서는 일회용품 중에서 탄약에 대한 저장탄약신뢰성프로그램을 통해 탄약의 경우 신뢰성 확보를 위해 정부에서 어떤 일을 하는지 먼저 살펴보았다. 정부에서는 저장탄약신뢰성프로그램을 통해 주기별로 일반검사, 저장가능시험, 저장분석시험, 약작용 조사분석 등으로 통해 탄약을 계속 저장, 1년 내 소모, 60일내 폐기 등으로 분류함을 살펴보았다.

통계분석적인 측면에서 탄약과 같은 일회용품에 대한 신뢰성분석 방안으로 어떤 것이 있는지 알아보았다. 구체적으로 통계학에서 로트의 품질수준을 파악하는 샘플링검사를 활용하여 일정한 시기에 생산된 탄약에 대한 저장신뢰성의 수준을 파악할 수 있었다. 특히 본 연구에서는 KS Q 0001인 계수규준형 1회 샘플링검사표를 이용하여 생산자와 소비자 양쪽을 보호하는 방법에 대하여 살펴보았다.

다음으로 탄약의 저장신뢰도를 파악할 수 있는 방법으로 비모수적인 방법과 모수적인 방법을 소개했다. 여러 가지 비모수적인 방법 중에서 특히 Kaplan-Meier 방법을 사용하면 중도중단데이터가 포함된 경우에도 저장신뢰성을 정량적으로 파악할 수 있음을 보여주었다. 마지막으로 모수적인 방법중에는 신뢰성분석에 많이 활용되는 와이블분포가 탄약의 저장신뢰도를 파악하는 데에도 활용될 수 있음을 보았다.

본 연구에서는 일회용품에 대한 신뢰성분석 방안을 이론적인 측면에서 살펴보았다. 하지만 탄약과 같은 일회용품은 저장탄약신뢰성프로그램에 따라 일정 기간 저장되면서 때가 되면 여러 가지 시험 또는 검사를 거쳐 계속 저장, 폐기 등의 수순을 밟으면서 실제로 데이터를 생성하게 된다. 따라서 추후에는 실제 데이터를 살펴보면서 본 연구에서 제안한 방법들이 얼마나 유효한지 파

악할 필요가 있다. 아울러 탄약의 저장 중 성능의 저하에 영향을 미칠 수 있는 요소들이 무엇인지 파악하고, 이들 요소들을 시험 및 검사결과와 연계하여 탄약의 상태를 과학적으로 판단할 수 있는 빅데이터 방법론의 개발이 필요하다고 본다.

References

- [1] 국방부 (2012). 저장탄약신뢰성평가(ASRP) 업무 훈령.
- [2] 국방기술품질원 (2015). 저장신뢰성평가업무요령.
- [3] 최재만 (2014). 항공탄약의 정량적 신뢰도 평가방안. 공사논문집, 제65집, 3-23.
- [4] 문병민, 선은주, 배석주 (2013). 작은 샘플 크기의 One-shot Devices를 위한 베이저안 신뢰도 추정, 신뢰성응용연구, 13(2), 99-107.
- [5] Ling et al. (2021). Mathematics, 9, 3032.
- [6] Balakrishnan et al. (2021). Accelerated Life Testing of One-shot Devices: Data Collection and Analysis, Wiley.
- [7] 국방기술품질원 (2011). 국방과학기술용어사전.
- [8] 방위사업청 (2015). 종합군수지원 개발 실무지침서.
- [9] 백재욱, 박정원 (2017). 신뢰성공학, 한국방송통신대학교출판부.
- [10] 국가표준인증 통합정보시스템
<https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do>
- [11] 최주란, 허장욱 (2016). One shot device의 저장 신뢰도 분석에 관한 연구, 한국신뢰성학회 학술대회논문집 (2016.05), 170-176.
- [12] 윤근식, 이종찬 (2012). 저장탄약의 품목별 신뢰도평가 사례 연구, 품질경영학회지, 40(3), 259-269.
- [13] 류장희, 백승준, 손영갑 (2010). 가부반응 데이터를 가지는 탄약 체계의 신뢰도 추정방법 비교, 한국군사과학기술학회지, 13(6), 982-989.
- [14] 윤근식, 박상원 (2014). ASRP자료를 이용한 155MM 추진장약 KM4A2 저장수명 추정 연구, 품질경영학회지, 42(3), 291-299.

백 재 욱(Baik, Jaiwook)



- 1992년 04월~현재 : 한국방송통신대학교 통계·데이터과학과 교수
- 1986년 09월~1991년 05월 : 미국 Virginia Polytechnic Institut and State University 통계학박사
- 1983년 09월~1986년 05월 : 미국 University of Wisconsin-Madison 통계학석사
- 1976년 03월~1983년 02월 : 중앙대학교 응용통계학과 학사
- 관심분야 : 통계학, 생산관리
- E-Mail : jbaik@knou.ac.kr