

Monte Carlo simulation-based defect ratio estimation approach for a chemical materials stockpile reliability program*

Baik, Seungwon** · Kim, Wukki*** · Lee, Namrye**** · Yi, Haeyen***** ·
Jeong, Yongjun***** · Ahn, Namsu*****

ABSTRACT

A chemical material stockpile reliability program (CSRP) that determines the usability, safety, reliability, and performance of chemical equipment and materials is developed to determine the storage or disposal of chemical material stockpile (Storage Chemical Equipment and Material Reliability Evaluation Instruction, 2019). However, current inspection for current CSRP depend on test and evaluation of criteria for level of importance, and so the number of samples and acceptance quality limit (AQL) are presented based on the lot size. All the processes are conducted under KS Q ISO 2859-1, and the defect rate of the entire lot of CSRP items is generally assumed to be a distribution that is similar to a binomial distribution. However, the pass-fail test for CSRP items is based on approximately 10 test items, and the factors that cause defects in these items are also heterogeneous. We propose a new methodology for estimating the defect rates of CSRP items based on Monte Carlo simulations, which are widely used in various academic fields. In addition, we show the future applicability of the methodology by applying it to the K1 gas mask case and revealing the results of the defect rate estimation. We also present future work, including the need for a standard sample of CSRP items.

Keywords : chemical materials stockpile reliability program, KS Q ISO 2859-1, Monte Carlo simulation, Weibull distribution, binomial distribution

* This research was supported by Korea Military Academy and Defense Agency for Technology & Quality in 2022 and 2023.

** (First Author, Corresponding Author) Korea Military Academy, Department of Mechanical and Systems Engineering, Assistant Professor, sbaik@kma.ac.kr, <https://orcid.org/0009-0003-6433-8553>.

*** (Co-Author) Korea Military Academy, Department of Economics and Law, Associate Professor, wukkikim@mnd.go.kr, <https://orcid.org/0000-0003-1869-0997>.

**** (Co-Author) Defense Agency for Technology and Quality, Defense Reliability Research Center, Principal Researcher, nrlee10857@hanmail.net, <https://orcid.org/0000-0002-3607-1391>.

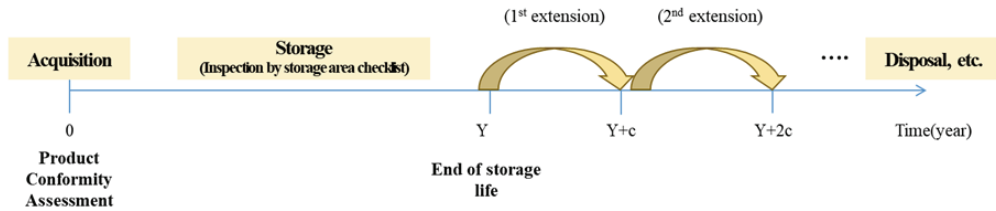
***** (Co-Author) Defense Agency for Technology and Quality, Defense Reliability Research Center, Senior Researcher, yihayen@dtaq.re.kr, <https://orcid.org/0009-0005-4425-9238>.

***** (Co-Author) Defense Agency for Technology and Quality, Defense Reliability Research Center, Researcher, yongjunjeong@dtaq.re.kr, <https://orcid.org/0009-0005-7939-2987>.

***** (Corresponding Author) Korea Military Academy, Department of Mechanical and Systems Engineering, Associate Professor, ahn77@mnd.go.kr, <https://orcid.org/0000-0003-9251-2565>.

I. 서론

군은 저장 중인 화생방 장비·물자에 대한 사용가능성(serviceability), 안전성(safety), 신뢰성(reliability), 성능(performance) 등을 평가하여 해당 장비·물자의 획득·저장 및 시험·폐기 등에 필요한 자료를 제공하는 저장 화생방 장비·물자의 신뢰성 평가업무(chemical materials stockpile reliability program, 이하 CSRP)를 수행하고 있다.¹⁾ 방산업체 등에서 생산된 화생방 물자·장비는 최초 생산품 검사 및 품질적합성 검사를 거쳐, 초기 품질요구수준 이상을 보장하는 장비·물자가 소요군에 인계된다. 이후 저장기간 동안 특정 저장환경에서 보관하고, 저장수명이 도래한 시점(Y-year)에 각 품목의 저장시험절차서 기준에 따라 일반검사(육안검사) 및 기술검사(이·화학검사)²⁾ 항목에 대한 검사를 진행하여 로트³⁾ 단위 합/불을 판정하고, 그 결과에 따라 지속 보관 혹은 폐기 등을 결정한다(Figure 1).



<Figure 1> General storage test procedure⁴⁾

Figure 1과 같이 저장수명이 Y년, 검사주기가 c년인 CSRP 품목은 동일 로트가 소요군에 납품된 시점부터 Y년 경과한 해에 최초 저장시험을 진행한다. 이 저장시험에서 합격한 경우, 다음 검사주기인 c년 후까지 해당 로트를 다시 저장하고, 검사에 불합격한 경우, 불량률의 경·중을 고려하여 교보재 활용 또는 폐기 등이 결정된다.⁵⁾ 저장시험 과정에서 로트 단위는 제조회사와 생산 시기가 동일해야 하며, 저장장소 및 저장조건이 유사한 로트를 검사 및 시험로트로 구성한다. 또한, 대상 로트를 대표할 수 있는 시료는 랜덤(random) 샘플링으로 채취하며, 랜덤 샘플링이 불가능할 경우, 사유와 적용한 샘플링 방법을 명시하고 있다. 각 검사항목은 결함의 치명 정도에 따라 치명, 중대, 경

- 1) 저장 화생방장비·물자 신뢰성평가(CSRP) 훈령(국방부훈령 제 2571호) 제1조 목적.
<https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000202929>
- 2) 물품의 물리적 성질 혹은 화학적 성분을 분석하는 시험
- 3) 생산이 이루어지는 단위 수
- 4) 저장 화생방장비·물자 신뢰성평가(CSRP) 훈령(국방부훈령 제 2571호) [별표 6] 품목별 저장수명 및 검사주기(제17조 관련). <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000202929>
- 5) 저장 화생방장비·물자 신뢰성평가(CSRP) 훈령(국방부훈령 제 2571호) 제18조 후속조치.
<https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000202929>

미 부적합(이하 치명 · 중 · 경결함)으로 구분한다(부록 1).

군은 총 00개⁶⁾ CSRP 품목에 대한 국방규격과 저장시험절차서를 제정하여 활용 중이며, 일반에 게 잘 알려진 K1 방독면 또한 CSRP 품목 중 하나이다(Kim, Jung & Kim, 2018). 최근에는 기존 활용 중이던 K1 방독면을 대체할 목적으로 2016년부터 K5 방독면을 야전부대 보급하여 활용 중이다. K5 방독면(Figure 2)은 기존의 K1 방독면과는 달리 화학무기 및 국내 산업용 독성물질 사고에 대비한 산업용 독성 TIC(toxic industrial chemical) 정화통까지 추가로 개발되어 적의 고도화된 화학생방 위협에 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다(Kim et al., 2021). 이외에도 마이크로폰 연결 기능으로 기존의 KM25 전차용 방독면까지 대체 가능한 신형 방독면이다.⁷⁾



- Weight: 482 g
- Field of View : Vertical 100°, Horizontal 100°
- Protection Duration : 120M
- Protection Against: Chemical warfare agents, Nuclear fallout, Toxic Industrial Chemicals

<Figure 2> Performance and specifications of K5 gas mask⁵⁾

K5 방독면을 포함한 모든 CSRP 품목의 종합 저장시험 합/불판정은 단일 시험 항목이 아닌 통상 00개 내외의 시험 항목의 결과로 결정되며, 이 항목들의 불량 발생요인 및 특성은 상이하다. 그럼에도 현행 KS Q ISO 2859-1,⁸⁾ MIL-STD-105E,⁹⁾ ANSI Z1.9¹⁰⁾ 등의 국 · 내외 관련 규정은 각 시험 항목에 대한 불량률을 단일분포로 적용하고 있다. 또한, 기존의 방식은 CSRP 품목이 일정 기간 성능과 효과가 유지되는 시효성 품목임에도 시간이 경과함에 따라 품질이 저하되는 것을 고려한 샘플링 방식을 취하고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 이러한 제한점을 극복하기 위해 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 새로운 불량률 추정 방법론을 제안하고자 한다. 해당 시뮬레이션 기법은 예측, 추정, 리스크 분석에 유용하게

6) 보안상의 이유 등으로 논문 내용 중 일부 값은 정확한 수치 제시 제한

7) 국방일보(2020.10.21.) 무기백과: K5 방독면.

https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20201021/4/BBSMSTR_000000100128/view.do

8) 계수형 샘플링 검사 절차, 제1부 로트별 합격품질한계(AQL) 지표형 샘플링검사방식.

9) Military Standard: Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes(1989.5.10.).

<https://variation.com/wp-content/uploads/standards/mil-std-105e.pdf>

10) American National Standard ASQ/ANSI Z1.9-2003(R2018).

생성되는 난수 생성기의 일종(Datalabs & Min, 2018)으로 각 시험 항목의 불량률 특성을 고려하여 CSRP 품목의 최종 합/불 결과를 확률적으로 제시하는 데 의의가 있다.

전체 논문의 구성은 2절에서 국내외 CSRP 품목에 대한 검사기준을 조사하여 기존의 방식을 요약하고 분석한다. 3절에서는 CSRP 품목의 다양한 시험 항목별 특성을 반영할 수 있는 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 불량률 추정 방안을 제안하고, 하나의 예로 K1 방독면의 기술검사 항목에 적용하여 불량률 추정 결과를 제시함으로써 본 논문에서 제시한 방법론의 향후 적용 가능성을 보이고자 한다. 마지막 4장은 표준시료의 필요성을 비롯한 향후 연구방향을 제시한다.

II. 국내·외 저장시험 관련 규정 및 참고문헌

2.1 KS Q ISO 2859-1(계수치 샘플링 검사 절차 제1부)

KS Q ISO 2859-1은 1999년 발행된 ISO 2859-1¹¹⁾를 기초로 작성된 계수형 샘플링 검사 절차서이다. 이 표준들은 합격품질한계(acceptable quality limit, AQL)를 품질 지표로 사용하며, 샘플링 검사의 결과가 최소 AQL을 넘어서는 수준의 품질이 유지되도록 샘플링 검사방식을 설계하는 특징을 지닌다. 구체적인 적용 방법으로는 우선, 로트 크기와 시험 항목별 특성을 고려한 검사수준(특별 검사 S-1~S-4, 보통검사수준-I~III)에 따라, 샘플문자(A~R)를 결정한다(부록 2). 샘플문자는 로트 크기가 커질수록 검사수준이 특별 검사수준 S-1에서 보통검사-III 단계에 가까울수록 샘플문자가 오름차순(A→R)으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 샘플문자는 샘플 크기를 의미하여 구체적인 샘플 크기는 부록 3의 두 번째 열에서 확인할 수 있다. 즉, KS Q ISO 2859-1 샘플링 규격은 로트 크기와 검사수준(특별 혹은 보통 검사수준)에 기초하여 샘플 크기를 결정한다. 예를 들어, 로트 크기가 30,000개이며 검사수준을 S-2로 결정한다면 부록 2에 의해 샘플문자는 D로 결정되고, 부록 3에 의해 샘플은 총 8개를 채취한다. 이 때, 합격품질한계(AQL)를 1.5(100개의 품목당 허용 부적합수 1.5)로 정한다면, 부록 3의 샘플문자 D와 AQL 1.5가 만나는 지점에서 $0/1(Ac/Re^{12})$ 합격 판정을 한다. 즉, 로트 크기 30,000개 모집단에 대해 8개의 시료 중 불합격 수가 0개라면 로트 합격, 불합격 수가 1개 이상이면 로트 불합격 판정을 하는 것이다.

KS Q ISO 2859-1은 종합 합/불판정 내리기 위해 여러 시험 항목결과가 필요한 경우에 관련 내용이 구체적으로 명시하고 있지 않다. 따라서, CSRP 품목의 각 시험 항목별 검사수준과 합격품질한계(AQL)를 제시하고, 그에 따른 샘플 크기와 합격기준(0/1 합격판정 등)을 결정하여 각 시험 항

11) ISO 2859-1:1999(en) Sampling procedures for inspection by attributes — Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2859-1:ed-2:v1:en>

12) Ac/Re: Acceptance/Rejection

목별 합/불을 도출한 뒤, 이 결과를 종합하여 CSRP 품목에 대한 전체 로트 합/불을 결정하는 것이 일반적이다.

2.2 국내·외 CSRP 저장시험 관련 규정

앞서 살펴본 KS Q ISO 2859-1 샘플링 방식은 미 국방규격으로 활용되고 있는 MIL-STD-105와 ANSI Z1.9의 로트 크기 구간, 최대 로트 크기, 검사수준, AQL, 시료문자, 샘플 크기 면에서 동일한 검사규격이다(Hong & Lee, 1996). 미 저장시험규격(storage serviceability standards)은 저장시험 품목(shelf life item) 전반에 대한 저장시험 규정을 제시하는 것으로 알려져 있으나, 미 국방계약관리본부(defense contract management agency, DCMA) 규정 외의 자료는 보안상 상세한 내용 확보가 제한된다. 우리나라는 화생방 물자·장비에 대한 관리체계 확립을 위해 '06년부터 CSRP를 본격적으로 시행해왔으며, 최초 미군의 체도를 도입하여 활용하였으나 이후 지속적인 연구를 통해 CSRP 전 품목에 대한 저장시험절차서를 개정 및 발전시켜 나가고 있다.

2.2.1 미 DCMA(Defense Contract Management Agency) 제품 검사¹³⁾

미 국방계약관리본부(DCMA)의 제품검사 규정은 제품검사 흐름도(product examination flowchart)를 제외한 관련 규정 전반을 민간에 공개하고 있다. 그리고 DCMA 제품 검사방식은 기본적으로 샘플에 대한 0/1 합격판정 방식을 따른다. 관심품목의 계약서 등에 구체적인 내용이 미명시된 경우에 치명 결점은 0.4, 중결점은 1.0, 경결점 4.0의 합격품질한계를 제시하여 적용 중이다. 샘플 크기는 로트 크기와 합격품질한계를 기초로 결정되며, 로트 크기와 합격품질한계가 지나치게 낮은 경우에 전수검사를 추천하고 있다.

2.2.2 국내 CSRP 저장시험절차서

국내 CSRP 품목에 대한 저장시험절차서는 '06년 방독면류와 제독제류를 시작하여 제정되어 현재까지 개정을 거쳐 현재 CSRP 품목 00종에 대한 저장시험절차서 규격을 적용하고 있다. 저장시험절차서의 로트 구성은 제조회사 및 생산 시기가 동일하고, 저장장소 및 조건이 유사한 로트를 검사 및 시험 로트로 구성하도록 하며 시험 시료는 기본 랜덤(random) 샘플링하도록 하고, 샘플링 검사규정은 KS Q ISO 2859-1을 따른다. Table 1은 방독면용 치명결점에 대한 예시로 저장시험절차서에는 중결점과 경결점의 세부 시험 항목과 방법이 포함되어 있다. 각 결점 수준(치명/중/경결점)은 일반검사(육안검사)와 기술검사(이·화학검사)로 구분되며, 각 시험 항목별 특성 및 요구수준을 고려하여 KS Q ISO 2859-1의 검사수준(특별/보통 검사) 및 합격품질을 적용하여 활용 중이다.

13) DCMA-INST 324, Product Examination(2014) and DCMA-INST 309, Government Contract Quality Assurance (GCQA) Surveillance Planning(2018). <https://www.dema.mil/Portals/31/Documents/Policy/DCMA-INST-324.pdf>

<Table 1> Classification of fatal defect types of gas mask

#	Defects	Methods
1	Gas mask ○○	Technical inspection
2	○○ resistance	
3	○○ device ○○ capabilities	
⋮	⋮	
6	○○ of ○○ strength	Visual inspection

2.3 국내·외 기존 저장시험 방식의 제한점

국내·외 저장시험 관련 규정은 많은 공통점을 지닌다. 기본적으로 미군은 MIL-STD-105와 ANSI Z1.9의 샘플링 검사를 규정하고 있으며, 국내 저장시험절차서는 KS Q ISO 2859-1 규정을 적용 중이다. 이런 샘플링 검사방식은 공통적으로 국제표준인 ISO 2859-1 샘플링 검사방식에 기초를 두고 있다. 또한, 각 검사항목은 일반검사와 기술검사 구분하며, 결점 수준에 따라 치명결점, 중결점, 경결점으로 세분화한다. 마지막으로, 결점 수준별(치명·중·경결점) 검사항목 특성에 따라 적절한 검사수준 및 합격품질한계를 적용 중이다. 따라서 현행 모든 국내 CSRP 품목은 KS Q ISO 2859-1(계수형 샘플링 검사절차)에 준하여 로트 크기와 합격품질한계(AQL)에 따라 0/1(Ac/Re) 등의 합격판정을 하고 있다. 일반적으로 로트 전체(모집단)의 불량률을 각 시험 항목의 특성에 무관하게 이항 분포(binomial distribution)를 가정한다.

하지만 이러한 방식의 샘플링 검사는 제한점이 존재한다. 첫째, 기존 ISO 2859 기반의 검사방식은 하나의 시험에 대한 대상 품목의 합/불을 판정하므로 CSRP 품목과 같이 통상 0~00개의 시험 항목 결과를 통해 종합 합/불을 판정하는 경우에 시험기관의 주관적인 종합 합/불 판정 기준을 제시할 수밖에 없다. 예를 들어, 모든 시험 항목에 대해 동일한 샘플링 검사를 진행하고, 이 실험항목 모두 통과한 경우만 종합 합격판정(합/불)을 할 수 있으며, 규정에서 제시한 전체 시료 수를 각 시험 항목별로 나누어 시험하고 종합판정할 수도 있다. 둘째, 기존 방식은 로트 전체의 불량률을 이항 분포 혹은 포아송 분포로 가정하므로,¹⁴⁾ 기타 불량률 분포특성을 가지는 시험 항목에 대한 적용이 제한된다. 셋째, 시간이 경과함에 따라 불량률이 높아지게 되더라도 이를 고려한 샘플링 검사방식을 별도로 제시하지 못한다.

2.4 CSRP 저장수명 분석 및 예측 관련 문헌

현재까지 각 시험 항목의 결과가 단일 품목의 최종 합/불을 판정하는 경우, 항목별 분포특성을

14) KS Q ISO 2859-1, 계수형 샘플링 검사 절차, 제1부 로트별 합격품질한계(AQL) 지표형 샘플링 검사방식(2019).

고려한 최종 합/불 판정 혹은 샘플링 검사방식을 제시한 참고문헌은 없다. 다만, 시험데이터를 기초로 CSRP 품목에 대한 저장수명을 분석하거나 예측한 연구를 살펴보면, Kim, Jung, & Kim(2018)은 저장시험물자인 K1 방독면의 저장수명을 예측하기 위해 조건부 확률인 베이지안 모델을 통해 시험 항목 중 저장수명에 주로 영향을 주는 시험 항목을 도출하였다. Jeong et al. (2022)은 인장강도 시험결과를 활용하여 고무류 화생방 물자의 저장수명을 회귀분석을 통해 고무류 화생방 물자인 장갑, 덧신의 갑피 및 밑창에 대한 저장수명을 구체적 수치로 예측하였다. 기존 연구는 시험데이터를 토대로 CSRP 품목의 저장수명에 직접 영향을 주는 시험 항목 도출이나 실제 저장수명을 예측했다는 점에서 의의가 있으나, 각 CSRP 품목의 저장수명에 대한 논의가 이루어졌을 뿐, 각 시험 항목별 특성을 대표하는 분포와 그에 상응하는 샘플링 방식을 제시하지 못하였다는 점에서 한계점이 존재한다.

III. 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 CSRP 품목 불량률 추정 방안

본 연구는 기존의 저장시험 방식의 제한점을 극복할 수 있는 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation) 기반의 불량률 추정 방안을 제안한다. 3.1절에서는 본 방법론에 활용될 수 있는 이산·확률 분포에 대해 살펴보고, 3.2절은 제안된 방법론의 각 단계별 과정을 제시한다. 3.3절에 K1 방독면에 대한 불량률 추정 예시를 통해 본 방법론의 적용 가능성을 제시한다.

3.1 이산·연속확률 분포 및 시뮬레이션 방법론

본 논문에서 제시하는 CSRP 품목 불량률 추정 방안에 활용되는 각종 확률분포와 시뮬레이션 방법론을 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

3.1.1 초기하 분포(hypergeometric distribution)와 이항 분포(binomial distribution)

베르누이 시행(Bernoulli trial)은 결과가 ‘성공’ 또는 ‘실패’의 두 가지 중 하나인 실험이다(Charalambides, 2010). 예를 들어, CSRP 품목의 각 시험 항목에 대한 검사기준을 통과한 경우 ‘합격’, 아니라면 ‘불합격’의 결과를 제시할 수 있으며, 불합격 발생 가능성을 확률 p 로 정의한다. 초기하 분포와 이항 분포는 베르누이 시행의 연속된 과정을 설명한다. 크기가 N 인 유한모집단(로트) 중 합격품의 수가 $M(\leq N)$ 개 포함된 경우, n 개의 시료를 비복원으로 채취했을 때 불합격품의 수는 초기하 분포를 따른다. 식 (1)을 통해, n 개의 시료 중 불합격품이 $x(\leq n)$ 개 나타날 확률을 산출할 수 있다(Lee, H. N., 2017).

$$f(x) = \frac{\binom{M}{x} \binom{N-M}{n-x}}{\binom{N}{n}} \quad (1)$$

이항 분포는 무한한 모집단(로트) 혹은 유한한 모집단이라도 복원추출을 하는 경우, 불합격 수의 분포를 나타낸다. n 개의 시료 중에서 불합격품이 x 개 채취될 가능성에 대한 분포이다. 불합격이 발생하는 확률은 p 로 고정된다. 로트의 크기가 커질수록, 초기 분포의 결과는 이항 분포의 결과에 수렴하게 된다(Lee, H. N., 2017).

$$f(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\binom{n}{x}$ 은 이항계수로 n 번의 시행에서 사건이 x 번 발생하는 경우의 수를 나타낸다.

3.1.2 포아송 분포(Poisson distribution)

단위 시간 혹은 면적에서 발생하는 사건, 사고 혹은 결점 수에 대한 분석을 위해 포아송 분포가 활용될 수 있다. 이항 분포에서 n 이 아주 크고, p 가 상당히 낮을 때, 이항 분포는 포아송 분포에 근사한다. 매개변수 $\lambda (=np)$ 에 대한 확률질량함수는 식 (3)과 같이 표현된다(Lee, H. N., 2017).

$$f(x) = \frac{\lambda^x}{x!} \exp(-\lambda) \quad (3)$$

3.1.3 와이블 분포(Weibull distribution)

와이블 분포는 제품 혹은 부품의 신뢰성 분석에 가장 널리 쓰이는 분포(Lai, Murthy, & Xie, 2006)로 1937년 재료의 파괴강도를 분석하면서 고안한 확률분포이다. 그 후, 여러 부품의 수명자료에 광범위하게 적용되어 오늘날 수명분포를 나타내는 대표적인 확률분포이다. 이 분포는 부품의 고장확률이 시간이 지남에 따라 낮아지거나, 일정하게 유지되거나, 높아지는 경우 모두를 표현할 수 있는 특징을 지닌다. 이 분포는 형태모수 α 와 척도모수 β 를 매개변수로 가진다(Lee, H. N., 2017).

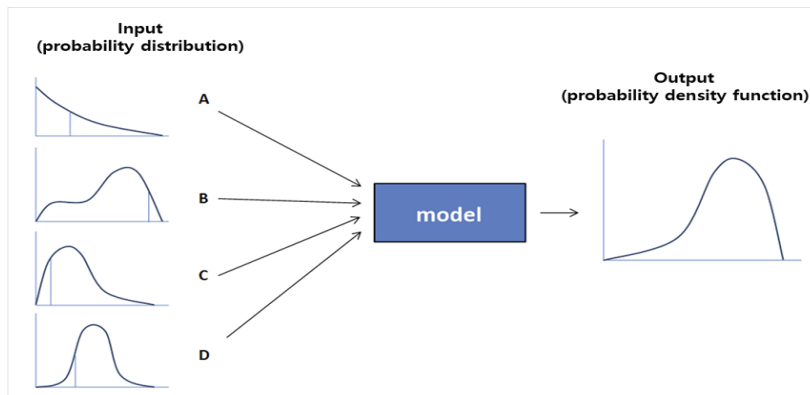
$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

와이블 분포는 형태모수 α 의 크기에 따라 상당히 유연하게 변화할 수 있어 식 (4)에서 $\alpha=1$ 이면, β 를 모수로 갖는 지수 분포(exponential distribution)와 동일하며, $\alpha=2$ 이면 레일리 분포

(Rayleigh distribution)와 동일하다(Lee, H. N., 2017). 앞서 살펴본 초기하 분포, 이항 분포, 포아송 분포와 달리 와이블 분포는 연속확률분포로 연속시간 상에서 각 부품에 수명시간에 대한 확률값이 식 (4)에 의해 결정된다.

3.1.4 시뮬레이션 방법론

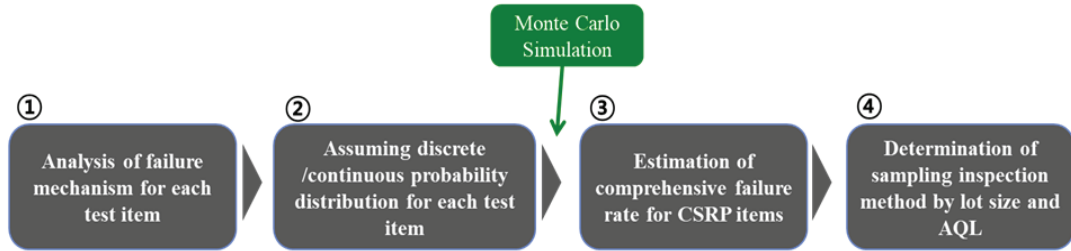
본 연구는 CSRP 품목의 종합 합/불판정을 위해 살펴본 다양한 이산 · 연속확률분포의 특성을 가지는 불량요인을 시뮬레이션 방법론을 통해 불량률을 추정하고자 한다. 이런 추정방식은 각 시험 항목의 불량요인이 다양한 형태를 보이더라도 각 시험 항목의 특성을 반영하여 종합 합 · 불을 판정할 수 있다. 각 시험 항목에 대한 불량률을 표현하는 여러 확률분포를 Figure 3의 확률적 시뮬레이션 방법론을 통해 품목의 종합 불량률에 대한 확률분포를 도출한다.



<Figure 3> Methodology for probabilistic simulation (Lee, H. N., 2017)

3.2 시뮬레이션 기반의 불량률 추정 방안

현행 모든 CSRP 품목은 KS Q ISO 2859-1(계수형 샘플링 검사절차)에 준하여 로트 크기와 합격 품질한계(Acceptance Quality Limit, AQL)에 따라 0/1(Ac/Re) 합격판정을 하고 있으며, 관심품목의 로트 전체(모집단)의 불량률을 이항 분포와 같은 단일분포로 가정한다. 하지만, 저장품목의 합/불 판정은 단일 시험 항목이 아닌 통상 00개 내외의 시험 항목의 결과로 결정되며, 이 시험 항목의 불량 발생요인 및 특성 또한 상이하다. 각 시험 항목의 불량 발생 요인 및 특징을 분석하여, 시험 항목별 불량률 분포를 합리적으로 가정할 수 있다면 CSRP 품목의 실질적인 불량률 추정이 가능할 것이다. 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 CSRP 품목 불량률 추정 방안은 Figure 4의 절차를 따른다.



<Figure 4> Estimation of failure rate of CSRP items based on Monte Carlo simulation

Figure 4의 ①-②단계에서 각 CSRP 항목별 시험 항목에 대한 불량발생 요인을 분석을 통해 각 검사항목에 적합한 확률분포를 다음과 같이 가정한다. (1) 물질적 특성을 고려한 초기 품질이 유지되는 불량요인에 대해서는 로트 크기를 고려하여 초기하 분포 혹은 이항 분포를 적용한다. (2) 보관기간 장기화에 따른 품질 저하가 존재하는 불량요인은 와이블 분포 혹은 시간이 지남에 따라 불량률이 증가하는 $p(t)$ 를 적용한 이항 분포이나 초기하 분포를 가정한다. (3) 외부 충격 등과 같이 발생 여부 및 간격 등이 간헐적이며, 예측불가능한 불량요인은 포아송 분포를 통해 시험 항목의 불량률 수준을 결정한다.

③단계는 ②단계 결과를 바탕으로 각 분포에 대한 몬테칼로 시뮬레이션 결과를 하나의 불량률 분포로 통합하는 과정이다. 단일 품목의 관점에서 여러 불량률 요인에 대해 가정된 분포를 기초로 난수를 생성하고, 해당 불량요인의 발생 여부(0/1)를 결정한다. 예를 들어 특정 시험 항목의 불량률이 초기하 분포를 따른다면, 전체 로트크기 n 에 대해서 불량률 p 에 해당하는 수만큼 임의의 불량을 생성한다. 이와 유사하게, 각 시험 항목에 대한 가정된 분포를 기준으로 각 품목에 대한 시험 항목별 불량 발생 여부를 모의한다. 이어서, 해당 품목의 불량요인이 하나라도 발생한 경우, 이 단일 품목은 불합격한 것으로 처리한다. 이 결과를 로트 단위로 분석하여, 로트 크기로 대비 불합격한 품목의 수로 로트의 불량률을 표현한다. 마지막 ④단계는 로트 크기 및 합격품질한계(AQL)를 고려한 샘플링 검사방식을 제시한다. 기존의 샘플링 검사방식은 각 불량요인에 대해 동일한 확률분포를 고려할 뿐 아니라, 시간 경과에 따른 불량률 변화를 반영하지 못한다. 하지만 이 방법론은 ③단계의 과정을 통해 CSRP 품목의 시험 항목별 불량요인에 대한 불량률 추정이 가능하며, 이를 바탕으로 각 불량 수준에 적합한 유연한 샘플링 검사방식을 제시할 수 있다.

3.3 K1 방독면에 대한 불량률 추정(예)

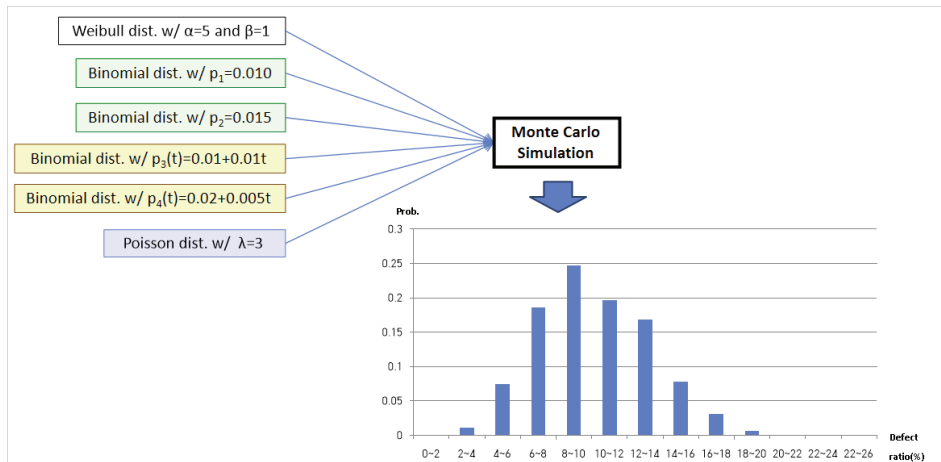
본 절에서는 각 시험 항목별 가정된 분포를 바탕으로 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 불량률 추정 방안의 적용 예시를 보이고자 한다. 시험 항목별 불량 발생 요인 및 항목 특성 분석 결과는 크게 물질적 특성(물성)을 고려한 초기 품질 유지, 보관기간 장기화에 따른 품질 저하 가능, 외부 충격에

의한 불량 발생 가능으로 구분할 수 있다. 예를 들어, 방독면의 기술시험 항목에 대한 불량 발생요인 분석 결과 및 분포 가정은 Table 2와 같다.

<Table 2> Failure mechanism and assumed distributions of K1 gas mask technical test

Inspection item	Failure mechanism	Assumed distributions
Gas mask ○○	- Physical properties	Weibull distribution
○○ resistance	- Long term Storage	Binomial distribution with $p(t)$
○○ device ○○ capabilities	- Impact	→ Poisson distribution
○○ transfer test	- Long term Storage	Binomial distribution with $p(t)$
○○ integration test	- Physical properties	Binomial distribution with p
○○ of ○○ strength	- Long term Storage	Binomial distribution with $p(t)$

Table 2에서 제시한 K1 방독면의 기술시험 6개 항목에 대한 확률분포를 기초로 모집단의 크기가 100인 로트에 대해 몬테칼로 시뮬레이션을 각 1,000회 시행한 결과는 Figure 5와 같다. 각 분포 추정에 필요한 모수 값들은 3.1절의 각 분포 설명에서 활용한 수학적 기호를 활용하여 Figure 5에 명시하였으며, 각 분포의 파라미터는 임의의 값이므로 본 시뮬레이션 결과가 실제 보관 중인 K1 방독면의 불합격 정도를 나타내지는 않는다.



<Figure 5> Estimation defect rates of K1 gas mask

Figure 5는 K1 방독면의 6개 기술시험 검사 결과를 종합하여, 로트 전체 대비 불합격 품목의 비율을 품목 불합격률(defect ratio, %)을 나타낸 것이다. 저장시험 6개 기술검사 항목 중 어느 한 시험 항목이라도 불합격이라면 종합 불합격으로 판정하였다. 즉, 본 방법론을 통해 각기 다른 시험결

과의 결과를 반영한 CSRP 품목의 종합 합/불 결과를 확률적으로 예측해낼 수 있다. 분석결과, K1 방독면의 100개 중 불량품 수가 4~6개일 확률이 약 7%라는 것을 의미한다. 7%의 확률은 총 1,000 회의 반복시험 중 70여회 시행에서 로트 전체 100개의 방독면 중 4~6개의 방독면에서 불량이 발생했음을 의미한다. Figure 5의 불량률 그래프가 약간 왼쪽으로 치우쳐진 형상은 시험 항목이 다수 존재하고, 하나의 항목에서라도 불합격되면 품목의 불합격이 발생할 수 있어서 나타난 결과로 볼 수 있다.

또한, 본 예시에서 다룬 100개의 로트에 대해 검사수준 S-2, 합격품질한계(AQL) 1.5를 적용한다면, 부록 3의 KS Q ISO 2859-1 샘플링 검사방식에 따라 8개의 샘플을 검사하여 0/1 합/불판정을 할 수 있다. 이때, Figure 5와 같이 품목의 전체 불량률에 대한 예측결과가 주어져 있으므로 이를 고려한 실질적인 샘플링 검사 방식을 선택할 수 있다. 뿐만 아니라, 각 시험 항목별 확률분포가 상이하므로 필요시 각 시험 항목에 대한 검사주기 또한 상이하게 적용하여 주요 관심 불량요인에 대한 집중적인 관리가 가능할 것이다.

IV. 결론 및 논의

본 연구는 시뮬레이션 기반의 CSRP 품목의 불량률 추정 방안을 제안하였다. 이 연구결과는 기존 국내·외에서 적용 중인 시험 항목별 단일분포를 가정 방식을 개선하여 시험 항목별 특성을 고려한 실질적인 불량요인이 최종 CSRP 품목의 불량률 추정에 활용된다는 장점이 존재한다. 또한, 실제 K1 방독면의 기술시험 항목 분석과 종합 불량률 추정을 통해 본 방법론의 적용 가능성을 제시하였다는 점에서 학술적인 시사점이 있다고 볼 수 있다. 세부적으로 본 연구의 의의를 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 현행 저장시험주기에 대한 탄력적 변화가 가능하다. 현재는 CSRP 품목별 저장 시험 주기가 모든 시험 항목에 대해 일정하게 유지된다. 하지만, 시험 항목별 특성에 따라 불량률을 예측하고 시간에 따른 불량률 추이를 살펴볼 수 있게 되면, 필요에 따라 시험 항목별 검사주기를 달리 적용할 수도 있다. 둘째, 효과적인 시료 수 선정방식을 제시할 수 있다. 현재 저장시험 절차서는 검사항목별 경중에 따라 시료 수를 선정하고 있지만, 본 연구의 방법론에서는 시험항목별 중요도뿐만 아니라 시간이 경과함에 따른 불량률의 민감도 추이를 고려한 시료 수 선정이 가능하다. 끝으로, 다양한 시험 항목별 특성을 고려한 CSRP 품목의 종합된 불량률 추정이 가능할 수 있다.

현재 실무에서 적용 중인 KS Q ISO 2859-1(계수치 샘플링 검사 절차 제1부)은 전체 로트 크기, 검사수준, 합격품질한계(AQL)을 기준으로 샘플링 수를 결정하고 있다(2.1절 참조). 하지만, 본 논문에서 제시한 방법론은 각 시험 항목별 결과를 바탕으로 품목에 대한 최종 합불 판정을 진행하므로, 목적에 따라 주관기관의 검사능력을 고려하여 시험 항목별 검사주기를 달리 적용할 수 있다. 다만 후속 연구자는 본 연구의 방법론을 적용하여 실질적인 결과를 도출하기 위해 향후 CSRP 품

목의 각 시험 항목별 타당한 분포를 가정할 수 있도록 충분한 실험결과를 확보할 필요가 있다. 특히, 이 실험결과는 유사한 보관 환경조건에서 구체적인 결과값이 제시되어야 한다. 이는 CSRP 품목에 대한 표준시료의 필요성과도 결부된다. 결국, 신뢰성 있는 환경에서 보관한 표준시료로부터 얻어진 시험결과를 토대로 각 시험 항목별 타당한 분포를 도출할 수 있을 것이다. 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 본 연구의 방법론을 활용하여 CSRP 품목에 대한 실질적인 불량률 추정이 가능할 것으로 예상된다.

Acknowledgements

We would like to thank Editage (www.editage.co.kr) for English language editing.

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Author contributions

Conceptualization: BS, KW, LN, and YH; Literature review: LN, AN, KW, and YH; Resources and Data curation: JY and BS; Investigation and Methodology: BS, AN, and KW; Writing (Original Draft): BS and AN; Writing (Review and Editing): BS; Project administration and Supervision: BS, AN, KW, LN, YH, and JY.

Reference

- Baik, S. W., Kim, W. K., Jeong, J. H., Ryu, J. Y., & Ahn, N. S. (2022, Oct 21). *Defect Rate Estimation Model for CSRP items using Monte Carlo Simulation*. Korean Society for Quay Management Conference in Fall 2022, Pohang, Korea. <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3988115>
- Charalambides, C. A. (2010). Discrete q -distributions on Bernoulli trials with a geometrically varying success probability. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 140(9), 2355–2383. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2010.03.024>
- Datalabs, & Min, G. H. (2018). *Risk Analysis and Decision Making using Monte Carlo Simulations*. Anyang, Korea: Eretec.
- Hong, S. H. & Lee, S. H. (1996). ISO 2859-1(1989), Sampling Plans Indexed by Acceptable Quality Level for Lot-by-Lot Inspection. *Journal of Korean Society Quality Management*, 24(3), 77–93. <http://www.riss.kr/link?id=A75553559>
- Jeong, Y. J., Yi, H. Y., Seo, J. Y., & Lee, N. R. (2022). Shelf-Life Prediction of Rubber CBRN Materials Using Actual Data. *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 23(9), 379–386. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.9.379>
- Kim, J. H., Jung, C. J., & Kim, H. J. (2018). Bayesian Estimation based K1 Gas Mask Shelf Life Assessment using CSRP Test data. *Journal of the KIMST*, 21(1), 124–132. <https://doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.1.124>
- Kim, S. K., Byun, K. S., Lee, S. Y., Park J. W., & In, C. Y. (2021). A study on the Process Quality Level of K5 Gas Mask. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 22(1), 74–80. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.74>
- Lai, C. D., Murthy, D. N., & Xie, M. (2006). *Weibull distributions and their applications*. In Springer Handbooks (pp. 63–78). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-288-1_3
- Lee, H. N. (2017). *Monte Carlo Simulations and Statistical Analysis*. Paju, Korea: Ja-yoo Academy.

원 고 접 수 일 2022년 12월 15일
 원 고 수 정 일 2023년 03월 26일
 계 재 확 정 일 2023년 04월 28일

부록

<부록 1> 결점수준 분류¹⁵⁾

결함정도	분류기준
치명 부적합 (치명결함)	그 제품을 사용, 유지 혹은 보관하고 있는 사람에게 위험이 미치거나, 안전하지 않은 상황을 초래할 것으로 예상되는 부적합. 또는 주요 최종 제품의 기본적인 기능에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상되는 부적합
중대 부적합 (중결함)	치명 부적합은 아니나 검사 단위의 실용성을 실질적으로 저하시키고, 초기의 목적을 달성하는 것이 곤란하다고 예상되는 부적합
경미 부적합 (경결함)	검사 단위의 실용성 또는 유효한 사용, 조작 등에는 거의 지장이 없다고 예상되는 부적합

<부록 2> KS Q ISO 2859-1의 샘플문자¹⁶⁾

로트크기	특별 검사수준				보통 검사수준		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2~ 8	A	A	A	A	A	A	B
9~ 15	A	A	A	A	A	B	C
16~ 25	A	A	B	B	B	C	D
26~ 50	A	B	B	C	C	D	E
51~ 90	B	B	C	C	C	E	F
91~ 150	B	B	C	D	D	F	G
151~ 280	B	C	D	E	E	G	H
281~ 500	B	C	D	E	F	H	J
501~ 1 200	C	C	E	F	G	J	K
1 201~ 3 200	C	D	E	G	H	K	L
3 201~ 10 000	C	D	F	G	J	L	M
10 001~ 35 000	C	D	F	H	K	M	N
35 001~150 000	D	E	G	J	L	N	P
150 001~500 000	D	E	G	J	M	P	Q
500 001 이상	D	E	H	K	N	Q	R

15) KS Q 3534-1, 통계 용어 및 기호(제 1부: 일반 통계 및 확률 용어) E.1.110.

<https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059198312760246>

16) KS Q ISO 2859-1, 부표 1-샘플문자(1999).

<부록 3> KS Q ISO 2859-1의 보통 검사 1회 샘플링 검사방식(17)

샘플 문자	샘플 크기	합격품절개 AQL, 부적합품률 및 100 아이템당 부적합수(보통 검사)																															
		0,010	0,015	0,025	0,040	0,065	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1000						
		Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re	Ac	Re				
A	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
B	3	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
C	5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
D	8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
E	13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
F	20	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
G	32	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
H	50	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
J	80	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
K	125	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
L	200	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
M	315	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
N	500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
P	800	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
Q	1250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				
R	2000	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓				

비고
 ▽ 화살표 아래의 최초의 샘플링검사 방식을 사용한다. 만약 샘플크기가 로트크기 이상이면 전수검사한다.
 ▲ 화살표 위의 최초의 샘플링검사 방식을 사용한다.
 Ac 합격판정개수
 Re 불합격판정개수

17) KS Q ISO 2859-1, 부표 2-A 보통 검사의 1회 샘플링 검사방식(1999).

몬테칼로 시뮬레이션 기반의 CSRP 품목 불량률 추정 방법론에 관한 연구*

백승원** · 김욱기*** · 이남례**** · 이해연***** · 정용준***** · 안남수*****

국문초록

군은 저장 중인 화생방 장비·물자에 대한 사용가능성, 안전성, 신뢰성, 성능 등을 평가하여 해당 장비·물자의 저장 및 폐기 등을 결정하는 신뢰성평가업무(Chemical Material Stockpile Reliability Program)를 진행하고 있다(저장 화생방장비·물자 신뢰성평가 훈령, 2019). 현행 모든 CSRP 품목은 시험항목별 중요도에 따라 검사수준을 결정되고, 로트크기를 고려하여 샘플 수와 합격품질한계(Acceptance Quality Limit, AQL)가 제시된다. 이 모든 과정은 KS Q ISO 2859-1(계수형 샘플링 검사절차)에 준하여 적용 중이며, 일반적으로 CSRP 품목의 로트 전체(모집단)의 불량률은 이항 분포와 같은 단일분포로 가정하고 있다. 하지만, CSRP 품목의 합/불은 단일 항목이 아닌 통상 10개 내외 시험항목의 결과로 최종 판정되며, 항목의 불량 발생요인도 상이하다. 본 연구는 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 CSRP 품목 불량률 추정 방법론을 토대로 K1 방독면의 기술검사 항목에 적용하여 불량률을 추정한다. 본 연구의 결과는 불량률 추정 관련 연구를 확장하였으며, CSRP 품목의 표준시료의 필요성을 제기하는 향후 연구방향을 제시하였다는 점에서 연구의 의의가 있다.

주제어 : 화생방 물자·장비 신뢰성 평가업무, KS Q ISO 2859-1(계수치 샘플링 검사 절차 제1부), 몬테칼로 시뮬레이션, 와이블 분포, 이항 분포

* 본 논문은 2022-2023년도 국방기술품질원 및 육군사관학교 화랑대연구소의 연구지원을 받아 수행되었다.
(2022 한국품질경영학회 추계학술대회 발표, 2022년 10월)

** (제1저자, 교신저자) 육군사관학교 기계·시스템공학과, 조교수, sbaik@kma.ac.kr, <https://orcid.org/0009-0003-6433-8553>.

*** (공동저자) 육군사관학교 경제·법학과, 부교수, wukkikim@mnd.go.kr, <https://orcid.org/0000-0003-1869-0997>.

**** (공동저자) 국방기술품질원 국방신뢰성센터, 책임연구원, nrlee10857@hanmail.net, <https://orcid.org/0000-0002-3607-1391>.

***** (공동저자) 국방기술품질원 국방신뢰성센터, 선임연구원, yihaeyen@dtaq.re.kr, <https://orcid.org/0009-0005-4425-9238>.

***** (공동저자) 국방기술품질원 국방신뢰성센터, 연구원, yongjunjeong@dtaq.re.kr, <https://orcid.org/0009-0005-7939-2987>.

***** (교신저자) 육군사관학교 기계·시스템공학과, 부교수, ahn77@mnd.go.kr, <https://orcid.org/0000-0003-9251-2565>.