

저장화생방물자의 저장수명(shelf life) 연한 설정에 대한 방법론 연구

김동욱*, 방성완**, 이남례***, 김도현***

*육군사관학교 물리화학과

**육군사관학교 응용분석학과

***국방기술품질원 이화학평가팀

e-mail:kami64@kma.ac.kr, kami64@naver.com

The study of determining the limit of shelf life extension of Chemical Materials Stockpile Reliability Program Society

Dongwook Kim*, Sugnwan Bang**, Nam rye Lee***, Do hyun Kim***

*Dept. of Physics and Chemistry, Korea Military Academy

**Dept. of Applied Mathematics, Korea Military Academy

***Defense agency for technology and quality

요 약

본 논문에서는 저장화생방물자의 저장수명 연장에 대한 한계를 설정하기 위한 통계적 방법론에 대해 논하고자 한다. 저장화생방물자는 저장화생방 장비·물자 신뢰성평가(CSRP)를 통해 폐기가 결정되기 까지 수명을 연장하여 사용해오고 있다. 문제는 저장수명의 한계가 설정되어 있지 않아 CSRPs를 통해 폐기가 결정되지 않는 한 수십 년 이상 저장되어 보관된다는 점이다. 오래된 장비/물자에 대한 신뢰성에 지속적으로 의구심이 제기되어 왔었기 때문에 저장화생방물자의 저장수명 한계를 설정해야 한다는 요구가 야전에서 지속적으로 있어 왔다. 본 연구에서는 로지스틱 회귀분석을 통해 5 품목의 저장화생방물자의 수명한계를 추정 제시하고자 한다.

1. 서론

군은 장기 치장되는 저장화생방물자의 효율적인 관리를 위해 2006년부터 저장화생방 장비·물자에 대한 신뢰성평가(CSRP)를 실시해 오고 있다. 2008년부터는 「저장화생방 장비·물자신뢰성평가(CSRP)」가 제정됨에 따라 규정과 방침에 따라 신뢰성 평가를 해오고 있으며 해마다 CSRPs를 적용하는 품목이 늘어 2020년 현재 OO 품목에 대한 신뢰성평가(CSRP)가 매년 시행되고 있다.

저장화생방물자 중 방독면, 화생방 보호의의 경우 새로운 장비/물자들이 개발되어 신규 전력화 대기 중이나 치장 중인 물자들이 여전히 유효한 것으로 평가되어 전력화 일정에 차질이 발생하고 있는 실정이다. 화생방물자들은 고무 및 화학물질들로 대부분 구성되므로 저장기간이 길어짐에 따라 성능저하가 발생할 것으로 예측되나, 저장수명의 한계점이 설정되어 있지 않아 CSRPs 결과에 따라서만 폐기 및 저장수명 연장이 결정되도록 규정되어 있다. 이에 따라 일부 화생방물자의 경우 최대 30년까지 보관되어 온 로트들이 존재하기도 한다.

오랜 기간 치장된 화생방물자를 전시에 사용할 경우 가용

도 및 신뢰성을 보장할 수 없으므로 최대 저장수명을 선정할 수 있는 과학적 방법론 연구가 절실하나 현재까지 이러한 연구가 진행된 적은 없다. 이에 본 연구에서는 2006년 이후 시행되어왔던 CSRPs 결과를 분석하여 5 품목의 저장화생방물자의 최대연장 수명에 대한 통계적 해석을 제시하였다.

2. 화생방물자의 최대 저장수명 예측을 위한 모델

2. 로지스틱 회귀모형을 이용한 K-1 방독면 저장수명 분석

K-1 방독면의 성능검사는 포장결점을 포함한 총 10가지 항목에 대하여 육안위주의 검사를 수행하는 일반검사와 방독면 누출 등 5가지 항목에 대하여 시험기를 사용한 기준치 초과 여부를 검사하는 기술검사로 수행된다. K-1 방독면의 CSRPs 시험자료를 살펴보면 일반검사 10가지 항목은 적합(proper) 및 부적합(improper)으로 평가되며, 5가지 기술검사 또한 항목별 측정값에 따라 적합 및 부적합으로 평가되어 수집·저장되었다.

일반적으로 화생방 저장물자의 저장수명을 분석할 때에는 수

집·관찰된 자료의 특성에 부합하는 통계적 분석방법이 적용되어야 할 것이다. K-1 방독면의 CSRP 시험자료는 적합 및 부적합의 이진 범주형 자료(binary categorical data)로 구성되므로, 본 논문에서는 로지스틱 회귀분석을 이용하여 K-1 방독면의 각 항목별 저장수명을 분석하였다.

3.1. 로지스틱 회귀모형의 소개

p 차원 설명변수 $\mathbf{x} \in R^p$ 에 대하여 반응변수 Y 가 두 가지 범주($y = 1$ 또는 0)를 나타내는 베르누이 확률변수일 경우, 즉 조건부 반응변수 $Y | \mathbf{x}$ 가 성공확률이 $\pi(\mathbf{x}) = P(Y = 1 | \mathbf{x})$ 인 베르누이 분포를 따를 때 반응변수의 조건부 평균은 $E(Y | \mathbf{x}) = P(Y = 1 | \mathbf{x})$ 와 같이 성공확률 $\pi(\mathbf{x})$ 을 의미하므로 전통적인 선형 회귀모형(linear regression model)의 적용은 부적합하다. 일반화 선형모형(generalized linear model)은 이산형 자료를 포함한 다양한 형태의 범주형 자료를 모형화할 수 있는 유연성을 바탕으로 많은 분야에서 널리 사용되는 통계적 모형이다. 특히 로지스틱 회귀모형(logistic regression model)은 이항 범주형 반응변수에 대하여 베르누이 분포를 가정하고 성공확률 $\pi(\mathbf{x})$ 를 추정하기 위한 일반화 선형모형이다.

로지스틱 회귀모형은 로지스틱 함수(logistic function)를 이용하여 반응변수의 조건부 평균, 즉 성공확률 $\pi(\mathbf{x})$ 를

$$\pi(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\beta_0 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\beta_0 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \quad (1)$$

와 같이 모형화한다. 여기서 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p) \in R^p$ 는 회귀계수 벡터이다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 로지스틱 회귀모형은 로지스틱 함수의 특성으로 설명변수의 임의의 실수 값 $\mathbf{x} \in R^p$ 에 대하여 성공확률 $\pi(\mathbf{x})$ 가 항상 0과 1사이의 값을 갖도록 모형화되며, 로짓변환(logit transformation)을 통해

$$\log\left(\frac{\pi(\mathbf{x})}{1 - \pi(\mathbf{x})}\right) = \beta_0 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta} \quad (2)$$

와 같이 선형모형으로 표현 된다.

로지스틱 회귀모형의 회귀계수($\beta_0, \boldsymbol{\beta}$)는 일반적으로 최대우도추정법(maximum likelihood estimation)으로 추정되며, 이때 로그 우도함수는

$$\log L(\beta_0, \boldsymbol{\beta}; \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n y_i(\beta_0 + \mathbf{x}_i'\boldsymbol{\beta}) - \sum_{i=1}^n \log(1 + \exp(\beta_0 + \mathbf{x}_i'\boldsymbol{\beta})) \quad (3)$$

와 같다. 식(3)을 최대화 하는 최대우도추정량은 닫힌 형태로 나오지 않기 때문에 일반적으로 수치적인 계산 알고리즘을 통해 추정한다. 본 논문에서는 R 프로그램의 glm() 함수를 이

용하여 회귀계수의 최대우도추정량을 계산하였다.

3.2. K-1 방독면 저장수명 분석 결과

본 논문에서는 K-1 방독면의 분석을 위하여 00년~00년까지 수행한 CSRP 000건의 시험결과보고서로부터 각 시험항목별 적합여부(y), 저장기간(x_1), 제조회사(x_2)를 수집하였으며, 김종환 등(2018)에서 제시한 바와 같이 K-1 방독면의 성능검사 15개 항목 중 유효한 평가항목으로 분석된 3가지 항목(방독면 누출, 전성배기변 누출, 음료취수장치 누출)에 대하여 저장수명을 분석하였다.

먼저 방독면 누출여부의 분석 결과 추정된 로지스틱 회귀모형은

방독면 누출여부 적합확률 :

$$\hat{\pi}(\mathbf{x}) = \frac{\exp(4.475 - 0.075x_1)}{1 + \exp(4.475 - 0.075x_1)} \quad (4)$$

와 같으며, 이때 제조회사(x_2)는 우도비 검정(likelihood ratio test)으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 전성배기변 누출여부, 음료취수장치 누출여부에 대한 분석 결과 추정된 회귀식은 각각

전성배기변 누출여부 적합확률 :

$$\hat{\pi}(\mathbf{x}) = \frac{\exp(4.217 - 0.120x_1)}{1 + \exp(4.217 - 0.120x_1)} \quad (5)$$

음료취수장치 누출여부 적합확률 :

$$\hat{\pi}(\mathbf{x}) = \frac{\exp(4.062 - 0.075x_1)}{1 + \exp(4.062 - 0.075x_1)} \quad (6)$$

와 같으며 마찬가지로 제조회사(x_2)는 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

Figure 1은 식 (4)~(6)의 추정된 적합확률을 저장기간에 대하여 나타내고 있으며, Table 1은 적합확률에 따른 최대 저장기간을 나타내고 있다. Figure 1과 Table 1로부터 3가지 시험항목 중 전성배기변 누출이 K-1 방독면의 저장수명에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 90%의 적합확률을 유지할 때 최대 저장기간은 16년 정도 되는 것으로 추정된다.

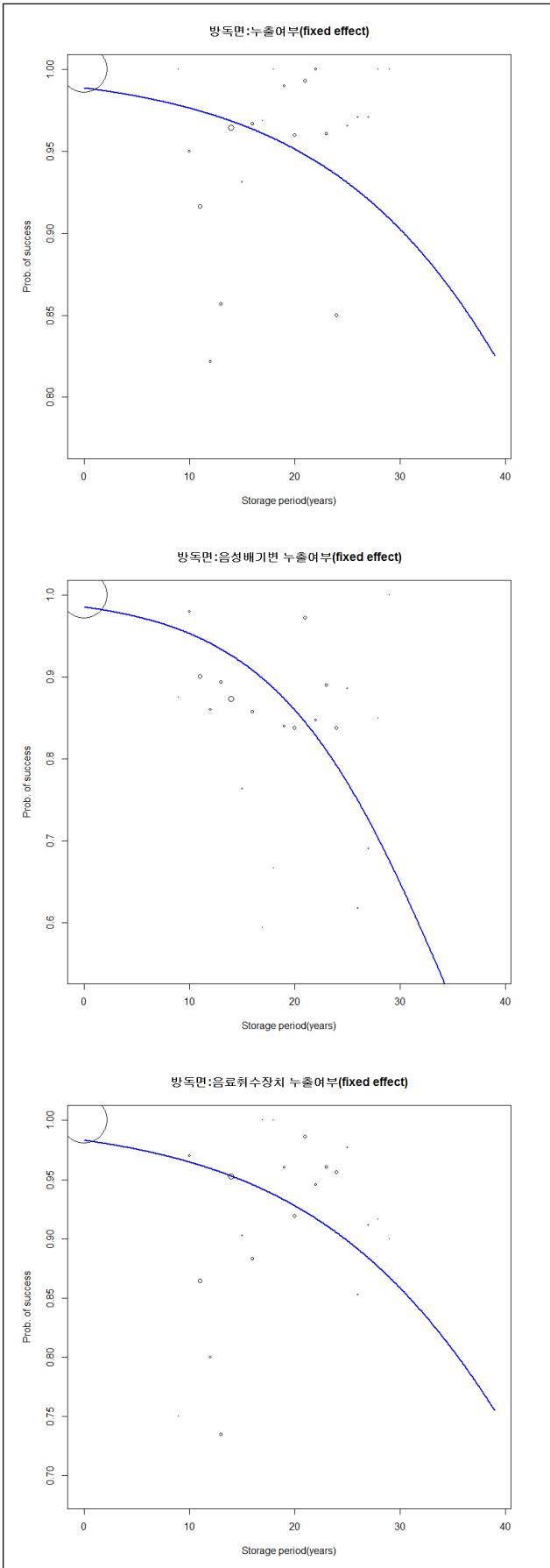


Figure 1. Estimated probability of success against storage period for the three K-1 Gas-Mask leakage tests.

Table 1. Estimated maximum storage period for the required probability of success.

구분	적합 확률			
	95%	90%	85%	80%
최대 수명기 간 (단위: 년)				
방독면 누출	20.43	30.40	36.58	41.23
진성배기변 누출	10.60	16.82	20.67	23.57
음료취수 장치 누출	14.85	24.77	30.91	35.54

3. 저장수명 예측의 한계와 분석

본 연구에서는 저장화생방물자의 저장 수명을 예측하는 방법론을 제시하였다. 본 연구의 한계점은 저장수명을 추정하기 위해서는 각 저장화생방물자의 성능 중 성능을 판별하는 검사항목의 연속된 데이터를 사용하는 것이 바람직함에도 불구하고 연구자료의 제한으로 인해 CSR에서 각 검사 항목별 합격, 불합격 여부를 분석하여 모델링을 했다는 점이다. 예를 들어 K-1 방독면의 경우 CSR에서 폐기로 결정되게 되는 가장 중요한 요소가 방독면 안면부 누출, 음료취수관 불량, 진성배기변 불량의 3가지 요소이다. 진성배기변 누출의 경우 실험조건에서 15mL/min 이하로 누출이 일어나는 경우 합격 판정을 받으면 각각의 시료에 대한 결과값이 기록되게 되므로 이 값을 사용하여 전체 시료에 대한 성능을 추정할 수 있다. 하지만 2006년부터 시행된 CSR의 결과값이 매년마다 다른 숙련도를 지닌 검사원에 의한 측정, 시료를 측정하는 기계의 교체, 매년 CSR 심사 방식의 변화(성능의 최고치를 측정하는 방식, 일정한 기준점을 넘기는 경우 중단하는 방식 등), 기록방식의 변화 등으로 연속 데이터를 이용하여 성능저하를 추정하는 것이 데이터의 신뢰성 저하로 인해 불가능하였다.

이에 따라 저장기간의 경과에 따른 합격/불합격 결과만을 가지고 분석을 하였기 때문에 제한되는 측면이 없지 않으나 각 로트의 합/불 여부에 영향을 미치는 요소들을 개별적으로 분석하고 로트에 대해 분석을 분리하여 시행함으로써 저장수명의 한계를 예측할 수 있는 방법론을 제공했다는 데 본 연구의 의의를 둘 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 김종환 외 2인, “CSR 시험데이터를 사용한 베이지안 추정모델 기반 K-1 방독면 저장수명 분석”, 한국군사과학기술학회지, 제 21권 1호, pp. 124-131, 2월, 2018년.