

실측 데이터를 이용한 고무류 화생방 물자의 저장수명 예측 연구

정용준, 이해연, 서지영, 이남례*
국방기술품질원

Shelf-Life Prediction of Rubber CBRN Materials Using Actual Data

Yongjun Jeong, Haeyen Yi, Jiyoung Seo, Namrye Lee*
Defense Agency for Technology and Quality

요약 본 연구에서는 인장강도 시험 결과를 이용하여 고무류 화생방 물자의 저장수명을 예측하였다. ASRP를 포함한 여타 분야와는 달리 그간 CSRP에서는 저장수명 예측에 관한 충분한 연구가 수행되지 못하였다. 특히 신체 보호에 직접적인 영향을 미치는 보호의류에서는 수명 예측에 관한 연구가 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 2007년부터 2021년까지 국방기술품질원에서 수행한 인장강도 시험 결과를 바탕으로 장갑과 덧신의 저장수명을 예측하였다. 수명 예측은 저장 기간에 따른 인장강도 값을 정리하고 회귀분석을 수행하는 방식으로 이루어졌다. 또한, 보다 엄격한 기준으로 수명을 예측하고자 예측구간 하한값에 따른 저장수명도 산출하였다. 회귀분석 수행 결과 장갑의 저장수명은 약 57년으로 예측되었으며 덧신의 갑피와 밑창은 각각 115년과 721년으로 예측되었다. 예측구간 하한값에 따른 저장수명은 이보다 낮았으며 저장 기간과 인장강도의 상관관계가 비교적 명확한 덧신 갑피에서는 두 가지 방식으로 예측한 수명이 유사하게 도출되었다. 본 연구는 실제 데이터를 바탕으로 고무류 화생방 물자의 저장수명을 예측한 첫 연구이며 향후 고무류의 저장수명 설정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract In this study, the shelf-life of rubber CBRN materials was predicted using tensile strength test results. Unlike other fields, including ASRP, no studies have been conducted on the shelf-life of protective clothing, which is one of the most important items in CSRP. Therefore, in this study, the shelf-lives of gloves and footwear-covers were predicted using tensile strength test results performed in DTaQ from 2007 to 2021. Shelf-life predictions were made by organizing tensile strength values by storage period and performing regression analysis. In addition, the lower limits of prediction intervals were used to predict shelf-lives using stricter standards. As a result of regression analysis, the shelf-life of gloves was predicted to be about 57 years, and those of the upper and sole of footwear-covers were predicted to be 115 and 721 years, respectively. Shelf-lives based on lower limits of prediction intervals were lower, and shelf-lives predicted by the two methods were similarly derived for the upper footwear-cover, for which the correlation between storage period and tensile strength was straightforward. Based on actual data, this study is the first to predict the shelf-life of rubber CBRN materials and should contribute to setting future shelf-life standards for rubber materials.

Keywords : CSRP, Shelf-Life Prediction, Rubber CBRN Materials, Regression Analysis, Prediction Interval

*Corresponding Author : Namrye Lee(Defense Agency for Technology and Quality)

email: nrlee@dtaq.re.kr

Received July 21, 2022

Accepted September 2, 2022

Revised August 24, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

화생방 무기는 화학, 생물학, 방사능 기반의 살상 무기로 특히 인체에 치명적인 영향을 미칠 수 있다[1]. 각국에서는 이러한 화생방 무기로부터 신체를 보호하기 위해 다양한 화생방 장비·물자를 공급하였다. 여러 화생방 장비·물자 중 보호의류는 화생방보호의와 화학방호용 장갑 셋, 화학방호용 덧신으로 구성되며 얼굴을 제외한 전신을 보호할 수 있어 가장 중요한 품목 중 하나로 꼽힌다. 특히 장갑 셋과 덧신은 의복으로 보호되지 않는 손과 발을 액체 또는 기체 상태 유해물질로부터 물리적으로 방호한다. 한편 장갑과 덧신을 착용한 후에도 다양한 작업을 원활하게 수행하고 이동에 제한을 받지 않기 위해서는 유연성, 저중량과 같은 사용성이 필수적으로 확보되어야 한다. 이처럼 물리적 방호력과 사용성을 동시에 확보하기 위해서는 내화학성이 높고 기체 투과성이 낮으면서도 신축성이 우수한 고무를 사용하는 것이 적합하다. 이러한 이유로 우리 군에서 운용 중인 장갑과 덧신은 고무로 만들어져 있으며 여러 고무 중에서도 작용제 방호 성능이 뛰어난 것으로 알려진 부틸 고무를 원재료로 채택하고 있다.

부틸 고무는 이소부틸렌(isobutylene)과 이소프렌(isoprene)의 공중합체인 합성 고무이다. 부틸 고무의 약 98%는 이소부틸렌으로 이루어져 있으며 이소프렌은 나머지 2%를 구성하고 있다[2]. 아래 Fig. 1에서 보는 바와 같이 부틸 고무의 이소부틸렌에 위치한 메탈기는 부틸 고무의 낮은 기체 투과도에 지대한 영향을 미친다.

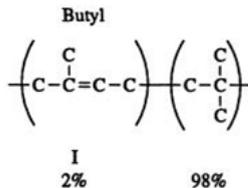


Fig. 1. Chemical Structure of Butyl Rubber[3]

통상적으로 기체는 고무 분자의 열진동에 따른 에너지를 전달받아 결합에서 결합으로 건너뛰며 고무를 통과하게 되는데 부틸 고무에서는 튀어나온 메탈기로 인해 고무 분자 간의 마찰이 발생하기 어렵고 결국 기체가 이동할만한 충분한 에너지가 발생하지 않기 때문이다[4]. 또한, 부틸 고무의 장점은 그것의 낮은 불포화도에 영향을 받는다. 이중결합은 외부 물질들이 흡착할 수 있는 장소이며 자외선, 온도의 영향에 쉽게 반응할 수 있는 위치이

다. 따라서 불포화도가 낮은 부틸 고무는 외부 요인으로 부터 영향을 받을 확률이 낮으며 내화학성, 내오존성, 내후성과 같은 특성이 우수하다[4].

부틸 고무의 성능은 인장 및 인열 시험, 경도 시험, 노화 시험 등 다양한 시험을 통해 측정한다. 이러한 시험 항목들은 KS M 6518 가황 고무 물리 시험방법에 기술되어 있으며[5] 부틸 고무로 만들어진 장갑과 덧신 역시 해당 규격을 참고로 하여 성능시험을 수행한다. 또한 장갑과 덧신은 화학작용제로부터의 방어라는 원 목적의 달성 여부를 판단하기 위해 화학작용제 방호력 시험을 추가로 수행한다. 국방기술품질원에서 수행 중인 CSRP (Chemical Materials Stockpile Reliability Program)에서는 다양한 시험 중에서도 인장강도 시험과 화학작용제 성능시험을 중심으로 하여 저장 보관 중인 장갑과 덧신의 성능을 평가한다[6]. 특히 인장강도 시험은 다양한 고무류에서 시행되는 시험으로 고무류의 물성을 판단하는 가장 기본적인 시험이다.

통계적 기법이 발달하면서 제품의 수명을 예측하는 다양한 모델들이 제시되었다. 모델들은 가장 단순한 형태인 회귀분석부터 복잡한 인공신경망을 기반으로 한 딥러닝까지 목적과 데이터의 규모 등에 따라 각기 다른 분석 기법을 차용하였다[7]. 이 중에서도 회귀분석은 계량형 데이터 분석에 사용되는 가장 기본적인 통계 분석 기법으로 두 변수 간의 상관관계가 가장 잘 나타난 모델을 도출하고 해당 모델이 실제 데이터에 얼마나 잘 들어맞는가를 판단하는 분석법이다. 국방 분야에서는 특히 저장 탄약의 수명을 예측하기 위해 다수의 연구에서 회귀분석을 활용하였다. Choi 등은 105 mm 고폭탄 추진제의 안정제 함량과 저장수명 간에 회귀분석을 수행하여 한계 수명을 예측하였으며[8] Yoon 등은 155 mm 추진 장약의 저장수명과 안정제 함량의 상관관계를 분석하여 회귀분석식으로부터 추정 수명을 예측하였다[9].

이처럼 ASRP(Ammunition Stockpile Reliability Program)를 포함한 다양한 분야에서는 회귀분석을 바탕으로 여러 인자와 수명의 상관관계를 파악하여 수명을 예측하였으나 현재까지 CSRP에서는 활발한 연구가 이루어지지 못하였다. 특히 신체 보호의 중요한 축을 담당하는 보호의류의 수명 예측 결과는 사실상 전무한 상황이다. 이에 따라 본 연구에서는 보호의류 중에서도 고무로 제작된 장갑과 덧신의 수명을 예측하고자 하였다. 이를 위해 여러 시험 항목 중에서도 고무류의 물성과 가장 연관성이 깊은 인장강도 시험을 선택하였고 2007년부터 2021년까지 15년간 축적된 실제 시험 결과들을 정리하

여 이들 결과로부터 저장 기간에 따른 인장강도의 변화 양상을 도출하였다. 특히 인장강도 결과는 수치로 나타나는 계량형 데이터이기 때문에 회귀분석을 수행하기에 적합하였다. 본 연구에서는 저장 기간과 인장강도의 상관관계를 파악하기 위해 회귀식과 예측구간을 활용하였고 각 분석으로부터 예상 수명을 도출하였다.

2. 시험 및 데이터 분석 방법

2.1 시험방법

장갑과 덧신의 인장강도 시험법은 KS M 6518에 명시되어 있다. 국방기술품질원에서는 해당 규격을 참고하여 장갑과 덧신의 인장강도 시험을 수행한다.

인장강도 시험을 위한 시편은 프레스와 뜰칼을 이용하여 동일한 크기로 채취한다. 장갑은 팔목의 평평한 부위에서 채취하며 덧신은 갑피와 밑창의 평평한 부위에서 각각 시편을 채취한다. 채취한 시편은 두께 측정기를 이용하여 두께를 측정한다. 두께를 측정한 시편은 아래 Fig. 2와 같은 만능재료시험기를 이용하여 인장강도를 측정한다.



Fig. 2. Example of Materials Testing Machine[10]

시편은 만능재료시험기의 그립에 강하게 고정되어야 하며 비틀림 등의 현상으로 잘못된 결과가 도출되지 않도록 바른 방향으로 고정되어야 한다. 시편이 고정된 후에는 만능재료시험기의 이동축을 정해진 속도로 움직여 시편에 하중을 가한다. 고정축과 이동축의 거리가 멀어질수록 시편에 가해지는 하중은 커지게 되며 시편이 감당할 수 있는 하중 범위를 벗어나게 되면 파단이 발생한다. 파단이 발생하는 순간의 하중이 시편에 가해질 수 있는 최대 하중(F_B)이며 이 값을 Eq. (1)과 같이 시편의 단면적(A)으로 나누어줌으로써 인장강도(T_B)를 구할 수

있게 된다[11].

$$T_B = \frac{F_B}{A} \quad (1)$$

한편 인장강도 값의 최종 기록은 다회 측정된 결과의 가중평균을 이용한다. 즉 측정값이 큰 순서대로 S_1, S_2, S_3, S_4 라 하면 측정값이 3개 일 때는

$$T_B = 0.7S_1 + 0.2S_2 + 0.1S_3 \quad (2)$$

로 계산하며 측정값이 4개 일 때는

$$T_B = 0.5S_1 + 0.3S_2 + 0.1(S_3 + S_4) \quad (3)$$

로 계산한다[12].

인장강도 기준값은 장갑과 덧신이 상이하며 덧신은 시험 부위(밑창, 갑피)에 따라서도 그 기준이 상이하다. 또한, 물자 납품 시 적용되는 국방규격의 기준값은 저장 물자에 적용되는 저장시험절차서의 기준값보다 엄격하게 적용되어 있다.

2.2 데이터 분석 방법

본 연구에서는 2007년부터 2021년까지 수행된 CSRP 시험 결과를 바탕으로 저장수명을 예측하였다. 15년간 장갑은 119개 로트에서 265개의 데이터가 축적되었으며 덧신은 115개 로트에서 576개(1개 로트에서 밑창과 갑피 2개의 데이터 도출)의 데이터가 축적되었다. 축적된 데이터는 로트별, 시험연도별로 정리하였으며 이 중에서도 4개년도 이상 시험을 수행한 로트만을 선별하여 수명 예측 분석을 위한 데이터로 사용하였다. 이는 지속성 있는 데이터 확보로 수명 예측 결과의 신뢰성을 확보하기 위함이며 경향성이 있는 결과를 도출하기 위함이다. 장갑에서는 23개 로트가 4개년 시험을 수행하고 3개 로트가 5개년 시험을 수행하여 총 26개 로트의 결과를 이용하여 수명을 예측하였으며 덧신에서는 35개 로트가 4개년 시험을 수행하여 해당 로트들의 결과를 이용하여 수명을 예측하였다.

고무류 화생방 물자의 수명은 앞서 언급한 인장강도 시험 결과를 기반으로 회귀분석을 수행하여 예측하였다. 회귀분석은 쉽게 접근할 수 있는 엑셀을 이용하여 수행하였다. 본 연구에서는 회귀분석과 더불어 예측구간 적용을 통해서도 수명을 예측해보았다. 예측구간은 회귀분석으로부터 얻어진 모델에 새로운 예측값이 특정 확률로 포함되는 구간을 의미한다. 즉, 95 % 예측구간은 회귀분석으로부터 얻어진 모델을 중심으로 하여 새로운 예측값이 95 % 확률로 포함될 수 있는 구간을 의미한다.

본 연구에서는 예측구간 하한을 이용하여 수명을 예측

하였다. 회귀분석으로부터 특정 저장 기간에 대응하는 인장강도 예측값이 얻어지며 해당 예측값은 예측구간 내에 특정 확률로 존재하게 된다. 기준값 미만의 제품은 치명적이므로 수명은 보수적으로 접근하여야 하며 이에 따라 예측구간 하한을 관찰함으로써 보다 엄격한 기준으로 수명을 예측할 수 있다. 즉, 인장강도의 예측구간 하한값이 기준값에 도달하는 시점을 파악함으로써 보수적인 저장 기간을 파악할 수 있다. $100(1-\alpha) \%$ 예측구간은 Eq. (4)에 따라 계산할 수 있다[13].

$$y_L = \hat{y} - t_{\alpha/2, n-2} S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4)$$

where $S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}$

- y_L : Lower limit of prediction interval
- \hat{y} : Estimated value of y for given x
- \bar{x} : Means of the x
- n : Number of observations
- t : Student's t value

3. 분석결과

3.1 장갑 수명 예측

본 연구에서는 장갑의 수명 예측을 위해 26개 로트의 인장강도 시험 결과를 아래 Fig. 3과 같이 시험 수행 연도별로 정리하였다. 대부분의 로트에서 저장 기간이 늘어남에 따라 인장강도 값이 저하되는 경향을 보였으나 해당 결과만으로 전체적인 경향을 파악하기는 어려웠다. 이에 따라 로트의 구분 없이 저장 기간에 따른 인장강도의 변화 양상을 정리하여 회귀분석을 우선으로 수행하였다. 이는 후술할 덧신에서도 동일하게 수행되었다.

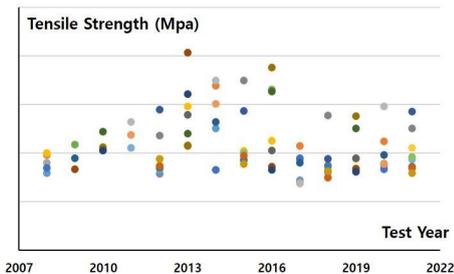


Fig. 3. Result of Glove's Tensile Strength Test Sorted by Lot Number

분석 수행 결과 유의한 F값은 0.000597로 0.05보다 작으므로 회귀식이 통계적으로 유의하여 종속변수를 예측하는 데 도움이 된다고 할 수 있다. 그러나 회귀분석을 통해 얻은 결정계수(R^2)는 0.107로 낮아 장갑에서는 인장강도 변화의 약 10 %만이 저장 기간의 변화에 영향을 받는다고 할 수 있겠다. 한편 저장 기간이 늘어남에 따라 장갑의 인장강도는 매년 0.16 MPa씩 감소하는 것으로 분석되었다. 아래의 Table 1은 회귀분석 수행 결과이다.

Table 1. Result of Glove's Regression Analysis (Tensile Strength vs Storage Period)

Multiple R	0.327
R Square	0.107
Significance F	0.000597
Shelf-Life Coefficient	-0.164
Observations	107

저장 기간에 따른 인장강도의 변화 양상은 아래 Fig. 4와 같이 그래프로도 도시하였다. 그림의 노란색 선은 국방규격 기준값을, 회색 선은 저장시험절차서 기준값을 나타낸 것이며 모든 시험 결과가 저장시험절차서의 기준값을 상회하는 것으로 나타났다. 반면 국방규격을 기준으로 하였을 때는 총 4개의 결과가 기준값을 하회하는 것으로 나타났다.

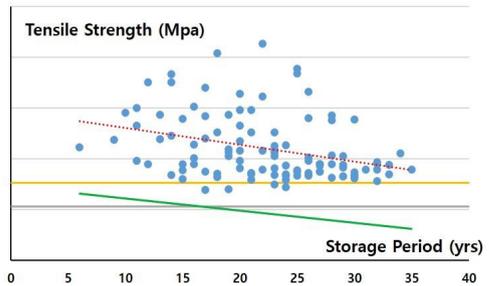


Fig. 4. Relationship Between Glove's Tensile Strength and Storage Period

한편 인장강도를 이용한 장갑의 저장수명은 회귀분석을 통해 얻은 회귀식과 95 % 예측구간 하한값을 이용하여 예측하였다. 회귀식은 Fig. 4의 빨간색 점선으로 회귀분석을 통해 얻은 기울기와 Y절편을 이용하여 도시하였다. 예측구간 하한값에 관한 식은 통상적으로 가장 널리 쓰이는 95 % 수준에서의 하한값을 추적함으로써 도출할

수 있었으며 위의 Fig. 4에 녹색 실선으로 표시되어 있다. 회귀식은 장갑의 인장강도가 매년 0.16 MPa씩 감소하는 것으로 예측하였으며 예측구간 하한값은 매년 0.12 MPa씩 감소하는 것으로 예측하였다. 또한, 저장시험절차서에 규정되어 있는 인장강도 기준값에 도달하는 시점을 저장수명으로 본다면 회귀식은 약 57년, 예측구간 하한값은 약 16년을 저장수명으로 예측하였다. 장갑에서는 데이터의 직선성이 약하게 나타남에 따라 95 % 예측구간이 비교적 넓게 형성되었고 이로 인해 회귀식으로 예측한 수명과 예측구간 하한값으로 예측한 수명 간에 간극이 발생한 것으로 보인다.

3.2 덧신 수명 예측

3.2.1 갑피 수명 예측

앞서 언급한 바와 같이 덧신은 갑피와 밑창으로 나누어 실험을 수행하므로 수명 예측 또한 각 부위에 대해 수행하였다. 덧신에서는 35개 로트의 인장강도 시험 결과를 이용하였으며 저장 기간에 따른 인장강도 변화 양상을 분석하기 위해 먼저 회귀분석을 수행하였다.

분석 결과 유의한 F값은 9.57×10^{-12} 로 0.05보다 매우 작아 회귀식이 종속변수의 예측에 도움이 된다고 판단하였다. 또한 결정계수(R^2)는 0.286으로 저장 기간 변화가 덧신 갑피의 인장강도 변화에 약 30 % 영향을 미치는 것으로 파악하였다. 마지막으로 저장 기간이 늘어남에 따라 덧신 갑피의 인장강도는 매년 0.0890 MPa씩 감소하는 것으로 나타났다. 아래 Table 2는 덧신 갑피의 회귀분석 수행 결과이다.

Table 2. Result of Upper Part of Footwear-Cover's Regression Analysis(Tensile Strength vs Storage Period)

Multiple R	0.535
R Square	0.286
Significance F	9.57×10^{-12}
Shelf-Life Coefficient	-0.0890
Observations	140

저장 기간에 따른 인장강도 변화 양상은 아래 Fig. 5에 나타내었다. 그림의 노란색 선은 국방규격 기준값을, 회색 선은 저장시험절차서 기준값을 나타낸 것이며 모든 시험 결과가 두 규격의 기준값을 상회하는 것으로 나타났다.

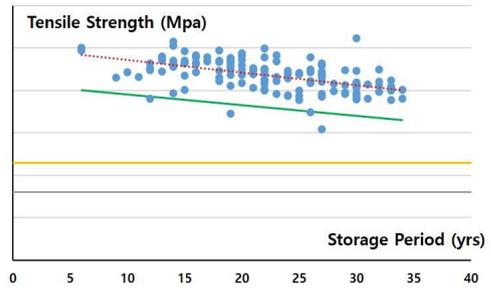


Fig. 5. Relationship Between Upper Part of Footwear-Cover's Tensile Strength and Storage Period

한편 회귀분석을 통해 얻은 회귀식과 95 % 예측구간 하한값을 계산하여 얻은 식은 덧신 갑피의 저장수명 예측에도 사용되었다. 회귀식은 회귀분석에서 얻어진 기울기와 Y절편을 이용하여 위의 Fig. 5에 빨간색 점선으로 도시하였으며 95 % 예측구간 하한값은 Eq. (4)를 이용하여 Fig. 5에 녹색 실선으로 도시하였다. 덧신 갑피의 인장강도 감소율은 회귀식에서 매년 0.089 MPa씩 감소하는 것으로 예측되었으며 예측구간 하한값에서는 매년 0.075 MPa씩 감소하는 것으로 예측되었다. 또한, 저장 시험절차서에 규정된 인장강도 기준값에 도달하는 시점을 저장수명으로 본다면 회귀식은 약 115년, 예측구간 하한값은 약 102년을 저장수명으로 예측하였다. 덧신 갑피는 상대적으로 직선성이 강하여 회귀식과 예측구간 하한값에서 예측된 수명이 유사하게 도출된 것으로 보인다.

3.2.2 밑창 수명 예측

덧신 밑창에서도 35개 로트의 인장강도 시험 결과를 바탕으로 저장 기간에 따른 인장강도의 변화 형태를 파악하고자 회귀분석을 우선 수행하였다.

분석 결과 유의한 F값은 0.38로 0.05보다 커 회귀식의 통계적 유의성이 없는 것으로 나타났다. 특히 회귀분석을 통해 얻은 결정계수(R^2)는 0.0056으로 매우 낮아 덧신 밑창에서는 인장강도의 변화와 저장 기간의 변화

Table 3. Result of Sole Part of Footwear-Cover's Regression Analysis(Tensile Strength vs Storage Period)

Multiple R	0.0747
R Square	0.00559
Significance F	0.380
Shelf-Life Coefficient	-0.00841
Observations	140

간 상관관계가 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 저장 기간에 따른 인장강도의 변화 역시 매우 낮은 값으로 매년 0.0084 MPa씩 감소하는 것으로 나타났다. 아래 Table 3은 덧신 밑창의 회귀분석 수행 결과이다.

이러한 양상은 저장 기간에 따른 인장강도 변화 양상을 나타낸 아래의 Fig. 6에서도 확인할 수 있다. 그래프에 따르면 저장 기간이 경과함에도 덧신 밑창의 인장강도는 거의 일정한 값을 유지한다. 이와 같은 형태의 그래프는 회귀분석에서 도출된 매우 작은 값의 기울기와 결정계수를 설명해준다. 즉, 덧신 밑창에서는 인장강도와 저장 기간의 그래프가 수평에 가까운 직선 형태로 나타나며 이에 따라 회귀식의 기울기와 결정계수가 매우 작은 값으로 나타난 것이다. Fig. 6의 노란색 선은 국방규격 기준값을, 회색 선은 저장시험절차서 기준값을 나타낸 것이며 모든 시험 결과는 두 규격의 기준보다 높은 것으로 나타났다.

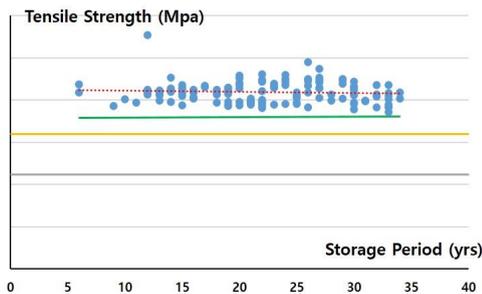


Fig. 6. Relationship Between Sole Part of Footwear-Cover's Tensile Strength and Storage Period

앞서 언급한 바와 같이 회귀분석을 통해 얻은 모델은 실제 데이터를 충분히 설명하지 못해 장갑 밑창의 수명 예측을 위해 사용하는 것은 부적절하다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 저장수명의 경향 파악을 위해 회귀분석으로 얻은 기울기와 Y절편을 이용하여 회귀식을 도시하였다. 회귀식은 상기 Fig. 6에 빨간색 점선으로 표현하였다. 회귀식에 따르면 덧신 밑창의 인장강도는 매년 0.0084 MPa씩 감소하며 저장시험절차서에 규정되어 있는 인장강도 기준값에 도달하는 시점인 저장수명은 약 721년으로 파악되었다. 95 % 예측구간 하한값은 Fig. 6에 녹색 실선으로 도시되었으나 양의 기울기를 가진 것으로 나타나 저장수명 계산이 불가능하였다. 이처럼 덧신 밑창의 인장강도는 저장 기간의 영향을 받지 않아 인장강도만으로는 수명을 예측하는 것이 불가능한 것으로 보인다.

본 연구에서 회귀식과 95 % 예측구간 하한값을 이용하여 도출한 저장수명은 아래의 Table 4와 같다. 표에서 보는 바와 같이 장갑과 덧신은 동일한 부틸계 고무를 사용했음에도 불구하고 저장수명 예측값에 있어 큰 차이를 보인다. 특히 덧신은 밑창과 갑피와 같이 채취 부위에 따라서도 다른 예측 양상을 보인다. 이와 같은 양상은 장갑과 덧신, 그리고 밑창과 갑피와 같이 사용 목적에 따라 두께와 성상을 달리하였기 때문으로 보인다. 실제로 국방규격에 명시되어 있는 인장강도 기준값은 각 부위에 따라 다르며 두께 역시 부위에 따라 다르다. 이처럼 제조사에서는 사용 목적에 따라 배합비, 가황 정도 등을 조절하여 적절한 성상을 갖게 하고 적합한 두께로 가공하므로 부위별 차이는 복합적인 요인으로부터 기인한 자연스러운 결과로 보인다.

Table 4. Expected Shelf-Life of Rubber CBRN Materials Derived From Regression Analysis and Prediction Interval

		Expected Shelf-Life (yrs)	
		RE*	95 % PI**
Glove set		57	16
Footwear-cover	Upper	115	102
	Sole	721	N/A

* Regression Equation

** Prediction Interval

4. 결론

본 연구에서는 고무류 화생방 물자인 장갑과 덧신의 인장강도 시험 결과를 바탕으로 저장수명을 예측하였다. 이를 위해 15년간 CSRP를 통해 축적된 저장 물자의 시험 결과를 취합하고 정리하였으며 저장 기간에 따른 인장강도의 변화를 파악하고자 회귀분석과 예측구간을 활용하였다. 분석 결과 장갑과 덧신에서 각기 다른 양상의 저장수명이 예측되었음은 물론이고 덧신 내에서도 갑피와 밑창 등 부위에 따라 다양한 스펙트럼으로 예측 수명이 형성됨을 알 수 있었다.

본 연구는 실제 데이터를 기반으로 고무류 화생방 물자의 저장수명 예측을 처음 시도했다는 점에서 의미가 있으나 향후 연구에서 보완되어야 할 한계점도 남겼다. 우선 본 연구에서 인장강도를 바탕으로 도출한 고무류의 저장수명은 통상적인 교체 주기보다 길지만, 실제 CSRP에서는 교체 주기 이전에 화학작용제 방호성능 미충족에

따른 불합격 로트가 발생하고 있다. 즉 인장강도 시험을 통과하였음에도 작용제 방호성능을 만족시키지 못하는 로트가 존재하는 것이다. 이는 현재 수행되는 인장강도 시험과 화학작용제 방호성능 시험 간에 충분한 상관관계가 형성되지 못하였음을 시사한다. 따라서 향후 연구에서는 인장강도 기준값의 적합성을 따져 인장강도 시험이 실질적인 의미를 가질 방안을 도출하여야 하며 화학작용제 방호성능 결과와 연관성을 가지도록 유도하여야 할 것이다.

또한, 본 연구에서는 접근성이 가장 높은 회귀분석과 예측구간을 활용하여 저장수명을 예측하였으나 향후 다양한 통계 분석 기법의 적용을 통해 분석의 신뢰성을 높일 필요가 있다. 일례로 Kim 등은 2018년 발표한 논문에서 K-1 방독면의 저장수명 분석에 적합한 모델로 베이지안 확률모델을 제시하였다[14]. 방독면 시험에서는 보다 다양한 항목들을 시험하며 계수형 데이터로 표출되는 항목들이 다수 존재하기에 베이지안 확률모델의 적용이 적합하다. 고무류 화생방 물자의 저장수명 분석에서도 인장강도 시험뿐만 아니라 화학작용제 방호성능시험을 포함하여 저장수명을 분석할 시에는 베이지안 확률모델을 활용할 수 있을 것으로 보인다.

References

- [1] S. A. Bland, Conflict and Catastrophe Medicine, p.964, Springer, 2014, pp.747-750.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2927-1_46
- [2] N. Mandlekar, M. Joshi, B. S. Butola, "A Review on Specialty Elastomers based Potential Inflatable Structures and Applications", *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol.5, No.1, pp.33-45, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.aiepr.2021.05.004>
- [3] M Lambla, Comprehensive Polymer Science and Supplements, p.730, Pergamon Press, 1989, pp.619-642.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096701-1.00239-1>
- [4] C. Y. Park, Y. B. Hwang, "Cure Characteristics, Physical Properties and Ozone Resistance of Butyl Rubber and EPDM Rubber Blends", *Elastomers and Composites*, Vol.46, No.4, pp.329-334, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.7473/EC.2011.46.4.329>
- [5] D. S. Shin, E. S. Jeon, Y. S. Kim, "Numerical Estimation of Bonding Force of EPDM Grommet Parts with Hollow Shaft Geometry", *Applied Sciences*, Vol.10, No.3169, pp.1-16, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app10093169>
- [6] D. H. Kim, Y. S. Lee, Y. J. Jeong, CSRP Stockpile Test Procedures in 2021, p.101 Defense Agency for Technology and Quality, 2021, pp.62-69.
- [7] S. J. Jung, J. W. Hur, "Deep Learning Approaches to RUL Prediction of Lithium-ion Batteries", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.19, No.12, pp.21-27, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.12.021>
- [8] M. J. Choi, H. J. Park, J. K. Yang, J. H. Baek, "A Study on the Shelf-Life Prediction of the Domestic Single Base Propellants Ammunition : Based on 105mm High Explosive Propellants", *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol.37, No.3, pp.36-42, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.11627/jkise.2014.37.3.36>
- [9] K. S. Yoon, S. W. Park, "A Study on the Estimation of Shelf-Life for 155mm Propelling Charge KM4A2 using ASRP's Data", *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol.42, No.3, pp.291-300, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2014.42.3.291>
- [10] Korinstech. Item Description-Materials Testing Machine-Single Column UTM. Korinstech, Available From: http://www.korinstech.com/bbs/board.php?bo_table=02_01&wr_id=65 (accessed Jul. 5, 2022)
- [11] K. T. Hwang, D. W. Seo, S. G. Cho, "Prediction of Long Term Performance and Creep of Laminated Natural Rubber Bearings(NRB)", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.17, No.3, pp.117-125, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2013.17.3.117>
- [12] KS M 6518, Physical Test Methods for Vulcanized Rubber, p.60, Korea Agency for Technology and Standards, 2021, pp.1-8.
- [13] K. M. Ramachandran, C. P. Tsokos, Mathematical Statistics with Applications in R, p.680, Academic Press, 2020, pp.301-341.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817815-7.00007-5>
- [14] J. H. Kim, C. J. Jung, H. J. Kim, "Bayesian Estimation based K-1 Gas-Mask Shelf Life Assessment using CSRP Test Data", *Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology*, Vol.21, No.1, pp.124-132, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.1.124>

정 용 준(Yongjun Jeong)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국과학기술원 생명화학공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 한국과학기술원 생명화학공학과 (공학석사)
- 2016년 10월 ~ 2019년 10월 : 한미약품 연구센터 연구원
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술품 직원 연구원

<관심분야>

품질경영, 신뢰성, 화생방물자, 화학공학

이 남 례(Namrye Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 경희대학교 대학원 화학과 (이화학석사)
- 2016년 2월 : 충남대학교 식품영양학과 (식품학박사)
- 1995년 12월 ~ 현재 : 국방기술품 직원 책임연구원

<관심분야>

화생방물자 신뢰성평가, 전투물자 품질보증

이 해 연(Haeyen Yi)

[정회원]



- 2004년 6월 : 모스크바 국립 항공 공과대학교 항공우주과 (공학사)
- 2006년 6월 : 모스크바 물리 공과 대학 항공우주/응용물리 (공학석사)
- 2006년 9월 ~ 2009년 12월 : LG 전자 DA연구소 연구원
- 2010년 1월 ~ 현재 : 국방기술품 직원 선임연구원

<관심분야>

신뢰성평가, 화생방물자, ASRP, 항공우주

서 지 영(Jiyoung Seo)

[정회원]



- 2005년 2월 : 광주과학기술원 환경공학과 (환경미생물학석사)
- 2010년 2월 : 광주과학기술원 환경공학과 (환경미생물학박사)
- 2010년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국생명공학연구원 연구원
- 2015년 10월 ~ 현재 : 국방기술품 직원 선임연구원

<관심분야>

대사물질분석, ASRP