ISSN 1229-1889(Print)
ISSN 2287-9005(Online)
J Korean Soc Qual Manag Vol. 42, No.3: 291-300, September 2014
http://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2014.42.3.291

ASRP자료를 이용한 155MM 추진장약 KM4A2 저장수명 추정 연구

윤근식 *† · 박상원 *
* 국방기술품질원

A Study on the Estimation of Shelf-life for 155mm propelling charge KM4A2 using ASRP′s data

Yoon, Keunsig *† · Park, Sangwon *
* Defense Agency for Technology and Quality

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to provide a statistical method from the data of ASRP's results and to apply to the reliability assessment of 155mm propelling charge, KM4A2.
Methods: The accumulated data through ASRP for 155mm propelling charge were analyzed using regression analysis and MINITAB reliability analysis. The analysis methods used for this study were applied to statistical data types such as continuous data, binominal data.
Results: The results of this study are as follows; The failure of 155mm propelling charge is mainly due to the broken charge bag, the decline of stabilizer content. The shelf-life(B5) regarding broken charge bag is 21.1years. The stabilizer content decrease with 0.0227%/year and safety storage period of propellant is 34.6years.
Conclusion: The shelf-life of 155mm propelling charge determined by charge bag is estimated 21.1years.

Key Words: ASRP, Ammunition, Reliability, Shelf-Life, One-Shot Device, Statistical Analysis

● Received 11 August 2014, revised 11 September, accepted 12 September 2014
† Corresponding Author(ksyoon@dtaq.re.kr)
ⓒ 2014, The Korean Society for Quality Management
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. 서 론

탄약은 1회성 품목이며 유사시를 대비하여 장기간 저장이 불가피하다. 탄약도 다른 물질과 마찬가지로 시간 경과에 따라 물리적, 화학적 열화반응으로 성능이 저하되거나 안전성이 떨어지게 된다. 그리고 제조 당시 동일한 품질을 가진 탄약의 경우에도 저장 온도, 습도 등의 저장조건에 따라 저장 간 신뢰성이 서로 다르게 나타난다. 따라서 저장탄약은 주기적으로 성능과 안전성을 확인하는 신뢰성평가가 필요하며 이러한 일련의 업무가 저장탄약신뢰성평가(ASRP; Ammunition Stockpile Reliability Program)이다(Kim, et al. 2010, 284-292).

국내에서는 국방기술품질원이 국방부로부터 ASRP 종합관리부서로 지정받아 ASRP업무를 주관하고 있다. 국방기술품질원은 육, 해, 공군이 보유하고 있는 저장탄약에 대해서 ASRP를 수행하고 그 결과에 따라 양호한 로트는 신뢰성을 보장하고, 성능이나 안전성이 저하된 로트에 대해서는 적기에 폐기하거나 경제적으로 성능을 복구할 수 있는 정비방안을 제시함으로써 국방전력의 유지와 예산절감에 기여하고 있다. 또한 ASRP 시험 프로세스에 6시그마 기법을 적용하는 등 업무프로세스의 개선에도 노력해 왔다(Yoon, et al. 2006, 13-21).

ASRP시험결과를 분석하고 평가하는 기법에 대해서도 연구가 이루어져왔는데 단기추진제의 저장수명 추정방안을 제시(Lee, et al. 2007, 45-52)하였고, 접근신관에 대해서 품목의 신뢰도를 추정하는 연구(Yoon and Lee 2012, 259-269)를 수행하였다. 이러한 연구는 현재 로트를 기준단위로 하는 저장탄약신뢰성평가를 품목단위의 평가로 전환하는데 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 현재 증가하고 있는 저장탄약 신뢰성평가 수요에 효과적으로 대처하기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요한 실제 시험을 최소화하는 평가기법의 지속적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 고에서는 ASRP 시험 데이터로부터 품목단위의 신뢰도 및 저장수명을 산출하는 분석기법을 연구하여 계량치와 계수치 자료로 구분하여 제시하고 155MM 추진장약 KM4A2의 ASRP시험 데이터를 이용해서 신뢰도 및 저장수명을 산출하였다.

2. 155MM 추진장약 KM4A2 제원 및 특성

155MM 추진장약 KM4A2는 155MM 곡사포에 사용되는 분리장전식 추진장약이다. 곡사포 KM114A2화포로 사격 시 포구속도(초기탄속)가 564 m/s이며, 고폭탄두 KM107을 사격할 때 최대사거리는 약 14.6 km 이다. Figure 1과 같이 기본장약(3호)과 각기 크기가 다른 4개의 증가장약(4~7호)으로 구성되어 있으며 점화패드, 섬광감소제가 같이 결합되어 있다.

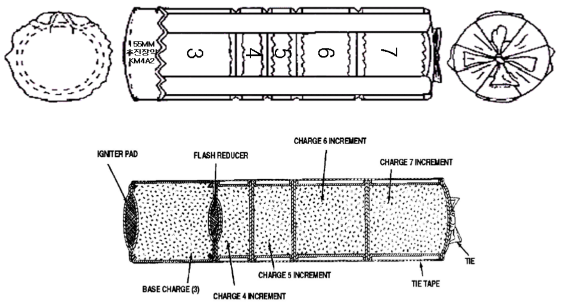

Figure 1. the configuration of 155MM propelling charge

Table 1. The composition and content of propellant KM1.

Composition	Contents(%)
Nitrocellulose	84.0
Dinitrotoluene	10.0
Dibuthylphthalate	5.0
Diphenylamine	1.0
Moisture	0.5

각각의 장약에는 추진제가 충전되어 있으며 추진제의 조성은 KM1이다. 추진제 KM1의 세부 조성은 Table 1과 같으며 주요 성분은 NC(Nitrocellulose)이다. NC는 질산에스테르 화합물로서 대기 중 또는 자체 내의 함유수분과 결합하여 쉽게 가수분해가 된다. 그리고 가수분해로 발생된 질소산화물은 분해반응의 촉매역할을 하게 되므로 추진제의 분해 반응을 더욱 가속화시켜 성능저하와 자연발화의 위험을 초래할 수 있다.

이러한 추진제의 분해반응을 억제하기 위하여 안정제로 디페닐아민(Diphenylamine)을 첨가한다. 안정제는 NC의 자연분해를 억제할 수는 없으나 자연분해과정에서 생성되는 질소산화물과 결합하여 분해반응이 가속되는 것을 막아준다. 추진제에 남아있는 안정제 함량을 측정함으로써 추진제의 저장안정성을 확인할 수 있으며 분석결과 안정제 함량이 낮을 경우 우선불출 사용하거나 폐기하여야 한다.

155MM 추진장약 KM4A2에 사용하는 약포의 섬유재질은 비스코스레이온(Viscos rayon)으로 연소 후에 잔사를 거의 생성시키지 않아 화포용 추진제에 많이 사용되고 있다. 그러나 산에 대한 저항성이 약해 장기간 저장된 추진장약에서 약포의 인장강도가 약해지고 파손되는 현상이 발생한다. 이는 추진제에서 발생한 질소산화물(NOX)과 주위 수분이 반응하여 생성된 질산(HNO_3)이 약포의 섬유조직을 파괴하고 결합력을 약화시키기 때문이다.

3. ASRP 데이터의 특성 및 분석방법

3.1 ASRP 계수형 데이터의 특성 및 분석방법

계수형 데이터는 결점수 또는 고장수의 형태로 나타내어지는 것으로 155MM 추진장약 KM4A2의 경우 약포파손, 약포변색 등이 있다. 저장탄약신뢰성평가(ASRP)에서 얻어지는 계수형 데이터는 시험시점에서 발생한 고장이 아니고 시험시점까지의 누적고장을 의미한다. 탄약은 단 한번 작동되는 one-shot 아이템으로 시험이나 사용 시 파괴되어 버리는 특징이 있기 때문에 정확한 고장시점 파악이 곤란하기 때문이다. 누적고장수로 측정된 계수형 데이터를 이용하여 품목의 신뢰도를 산출하고 미니탭의 임의관측데이터 분석으로 수명을 추정하는 방법을 제안한다.

품목 신뢰도 산출은 정상적인 기능을 제외한 고장이 발생하는 확률을 기준으로 나타낼 수 있다. 시간 t_i에서 시료 n개를 추출 시험하여 r개의 불량이 발생한다면 신뢰도는 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

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

위 식은 과거의 실험데이터를 이용하지 않고 현 시점에서의 실험데이터를 이용하여 신뢰도를 평가하는 것으로 비누적방식이다. 누적방식은 현재 시점까지 확보한 모든 데이터를 이용하여 나타내는 것으로 시간에 따른 신뢰도 값들이 크게 변화하지 않는 경우에 비누적식 보다 더 정확하게 신뢰도를 추정할 수도 있다. 즉 시간에 따른 신뢰도 저하속도에 비해 평가주기가 짧아서 평가 시의 신뢰도가 거의 동일할 경우는 누적방식을 사용할 수 있다(Sim et al. 2009, 105-116, Ministry of defence 2008, 1-23).

$$\hat{R}(t_i) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{i} r_i(t)}{\sum_{j=1}^{i} n_i(t)} \tag{2}$$

그리고 시료 n개를 시험하여 r개의 실패가 발생한 것을 가정할 때 모집단의 불량률은 시료를 취한 모집단의 실제 불량률의 상한, 하한값을 계산함으로써 추정할 수 있으며, 이를 위해 F분포를 사용한다(Edward 2004, 1-4). 아래 식은 모집단의 불량률에 대한 하한값(PL) 추정하는 식을 나타낸 것이다.

$$P_L = \frac{1}{1+[(n-r+1)/r]F_L} \tag{3}$$

여기서, r : 불량수
n : 시료크기
F_L : 요구 신뢰수준과 아래 자유도에 대한 F분포 값
v_1 = 2(n-r+1), v_2 = 2r

한편, 미니탭 s/w로 신뢰도 함수를 이용해서 저장수명을 추정할 수 있다. 저장수명을 정확하게 추정을 위해서는 고장발생 시간에 대한 정확하고 많은 데이터가 있어야 한다. 하지만 저장탄약 신뢰성평가에서 얻어진 시험데이터는 정확한 고장시점을 알 수 없는 누적고장자료이므로 Table 2과 같이 미니탭에서 분석가능한 데이터 형태로 전환하여 임의관측중단(Arbitrary censoring)분석 기능을 사용할 수 있다.

Table 2. The conversion example from ASRP data to Arbitrary censoring data type for Minitab

Shelflife	No. of sample	No. of failure
11	10	1
12	20	3
13	10	2
14	20	5
15	30	7

<ASRP data>

⇒

No.	start of interval	end of interval	No. of failure	No.	start of interval	end of interval	No. of failure
1	0	11	1	6	11	*	9
2	0	12	3	7	12	*	17
3	0	13	2	8	13	*	8
4	0	14	5	9	14	*	15
5	0	15	7	10	15	*	23

<Arbitrary censoring data type for Minitab>

관측기간은 사용자의 신뢰성을 보장하는 측면에서 보다 엄격한 조건으로 관측개시 시점을 “0”으로 적용하였다. 그리고 분포 ID 플롯(Distribution ID plot) 분석을 먼저 수행하여 분석 대상 데이터와 수명분포간의 적합도를 확인한 후 적합도가 높은 수명확률분포를 이용해서 평균수명과 Bp 수명 등을 산출할 수 있다(Seo 2006]. 신뢰성분야에서 광범위하게 사용되는 수명확률분포는 지수분포와 와이블분포(Weibull Distribution)이다. 지수분포는 일정 고장률을 가정하고 있어 일정한 고장률을 가진 시스템에는 적용이 쉬우므로 많이 사용되고 있다. 하지만 고장률이 증가하거나 감소하는 경우에는 1939년에 스웨덴의 과학자 와이블(W. Weibull)이 제안한 와이블분포(Weibull Distribution)를 대부분 사용한다. 다음 식은 와이블분포에 따른 고장함수 및 신뢰도함수를 나타낸 것이다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot (\frac{t}{\eta})^{\beta-1} \cdot e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}} \tag{4}$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}} \tag{5}$$

와이블 분포는 형상모수(shape, β)와 척도(scale, η)모수의 값에 따라 다양한 분포를 표현할 수 있다. 형상모수는

분포의 모양을 결정하는데 값이 1보다 크면 고장률이 증가하며 3.5이상이면 정규분포와 유사하다. 형상모수가 1이면 지수분포와 같이 동일한 고장률을 가지게 되고 형상모수가 1보다 작으면 고장률이 감소하며 감마분포와 근사하게 된다.

3.2 계량형 데이터의 특성 및 분석방법

계량형 데이터는 연속적인 값을 가지는 데이터를 말하며 155MM 추진장약 KM4A2의 경우 탄속, 안정제 함량 등이 있다. 계량형 데이터는 저장기간을 독립변수로 하고 계량형 특성치를 종속변수로 하는 회귀분석을 통하여 회귀방정식과 결정계수를 구하고 계량형특성치의 변화를 통계적으로 예측할 수 있다(Kim, Jung and Lee 1993, 161-170). 회귀분석으로 예측된 계량형 특성치가 주어진 한계기준에 도달하는 시간을 계산함으로써 저장수명을 추정할 수 있다. 수명을 알고자 하는 모집단의 저장기간과 특성치가 회귀식과 완벽한 선형관계에 있다면 정확한 예측이 가능하겠지만 실제의 경우에는 회귀식에 포함되지 않은 변수들의 영향으로 인해 종속변수의 추정에 차이가 발생한다. 따라서 어떤 임의의 독립변수 X_o 에 대한 정확한 종속변수의 오차 ε_o를 고려하여 다음과 같이 표시하며, 이것을 모집단 회귀모형이라고 한다.

$$Y_o = \alpha + \beta X_o + \varepsilon_o \tag{6}$$

회귀분석을 통해 알고자 하는 것은 결국 모집단 회귀식에서 α와 β이지만 현실적으로 모집단 전체의 자료를 가질 수 없기 때문에 표본에서 얻은 자료를 통해 α와 β를 추정해야 한다. 표본의 자료로 α와 β를 추정했을 때의 회귀식을 표본회귀식이라고 하며 잔차를 포함하여 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_o = a + bX_o + e_o \tag{7}$$

여기서, a와 b는 회귀계수이며 e_o는 모집단 회귀모형의 오차항 ε_o의 추정치로 이것을 잔차라고 한다.

어떤 저장기간에서 표본의 시험값은 회귀직선의 표준오차 편차 범위 내에 분포하게 되므로 이를 이용하여 신뢰수준을 고려해서 추정치를 예측할 수 있다. 주어진 독립변수 값 X_o (임의 저장기간)에서 (1-α)×100%의 자료가 있게 될 Y_o (측정값)의 신뢰구간은 다음 식으로 구할 수 있다. 여기서 저장수명은 신뢰구간의 하한값을 기준으로 추정하게 된다.

$$\hat{Y}_o - t_{\alpha/2;n-2} S_{Y_o - \hat{Y}_o} \leq Y_o \leq \hat{Y}_o + t_{\alpha/2;n-2} S_{Y_o - \hat{Y}_o} \tag{8}$$

여기서, n : 관측수

α : 유의수준

$\hat{Y}_o$: 회귀식에 의해 추정한 값

$S_{Y_o - \hat{Y}_o}$: $Y_o - \hat{Y}_o$의 표준편차

$t_{\alpha/2;n-2}$: t 분포 통계량

4. 실증 분석

155MM 추진장약 KM4A2의 저장수명을 추정하기 위해서 2005년부터 2013년까지 ASRP평가를 수행한 22개 로트의 시험 데이터를 분석하였다(Park et al. 2005, 262-272, Kim et al. 2007, 216-224, Na et al. 2009, 105-113, Koo et al. 2012, 117-137, Park et al. 2013, 150-175).

데이터 분석 결과, 155MM 추진장약 KM4A2는 저장기간 경과에 따라 약포파손, 약포인장강도 저하, 안정제 함량 저하 등으로 인해 신뢰성이 낮아지는 것으로 나타났다(Yoon 2013, 95-162). 이 중 약포파손과 안정제 함량이 추진장약의 저장수명을 결정하는 주요 요인임을 확인하였고 각각의 결점에 대해서 신뢰도 및 저장수명을 추정하였다.

4.1 약포 파손에 대한 신뢰도 및 저장수명 추정 결과

약포 파손은 155MM 추진장약 KM4A2에서 발생하는 주요 결점(고장)으로 Figure 2에 나타낸 바와 같다. 약포가 파손되면 장약호수의 조정이나, 장전이 불가능해 추진장약을 사용할 수 없으므로 폐기 처리하거나 약포를 교체 정비해야만 한다.

Figure 2. The appearance of broken charge bag

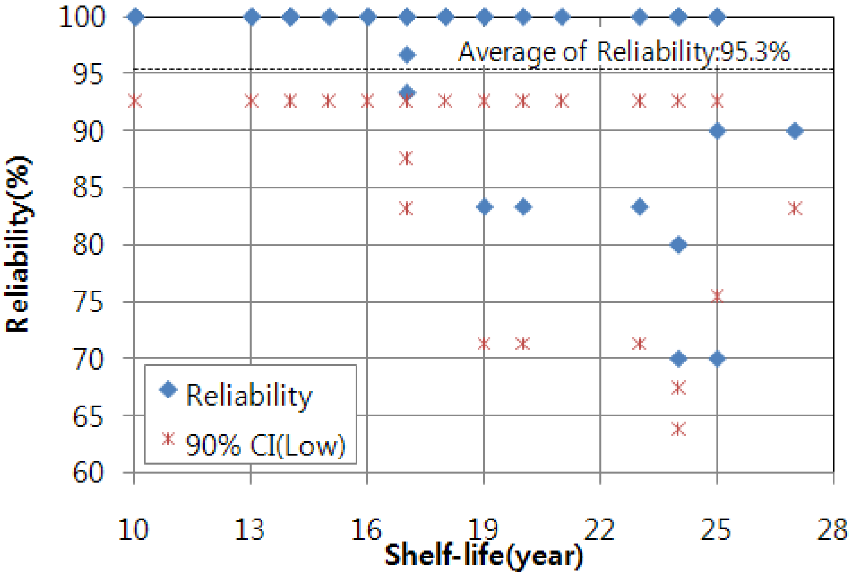

Figure 3. The reliability and 90% confidence interval on broken charge bag rate

약포 파손에 대한 저장기간별 신뢰도 및 90% 신뢰하한값을 Figure 3에 나타내었다. 저장기간이 17년이 경과하는 시점부터 약포 파손이 발생하기 시작하며 저장기간이 경과할수록 약포 파손은 증가하였다. 그리고 전체 신뢰도 평균은 95.3%로서 90% 신뢰구간을 고려한 하한값의 평균은 87.5%로 산출되었다.

Figure 4는 약포파손에 이르는 수명을 미니탭 s/w를 이용하여 분석한 결과이다. ASRP 시험데이터를 임의관측중단 분석기능을 사용할 수 있도록 전환하여 데이터를 입력하고 분포 ID 플롯(Distribution ID plot)을 수행하였다. 수명확률분포에 대한 적합도 검정을 한 결과 와이블분포, 대수정규분포가 Anderson Darling값이 146.922로 가장 낮았는데 이중 와이블 수명확률분포를 선택하고 최대우도법과 신뢰수준 95%를 적용하여 분석한 결과이다. 분석 결과를 보면 평균고장시간(MTTF, Mean Time to Failure)은 약 34.3년이며 그리고 B_1 수명은 15.4년, B_5 수명은 21.1년으로 추정되었다.

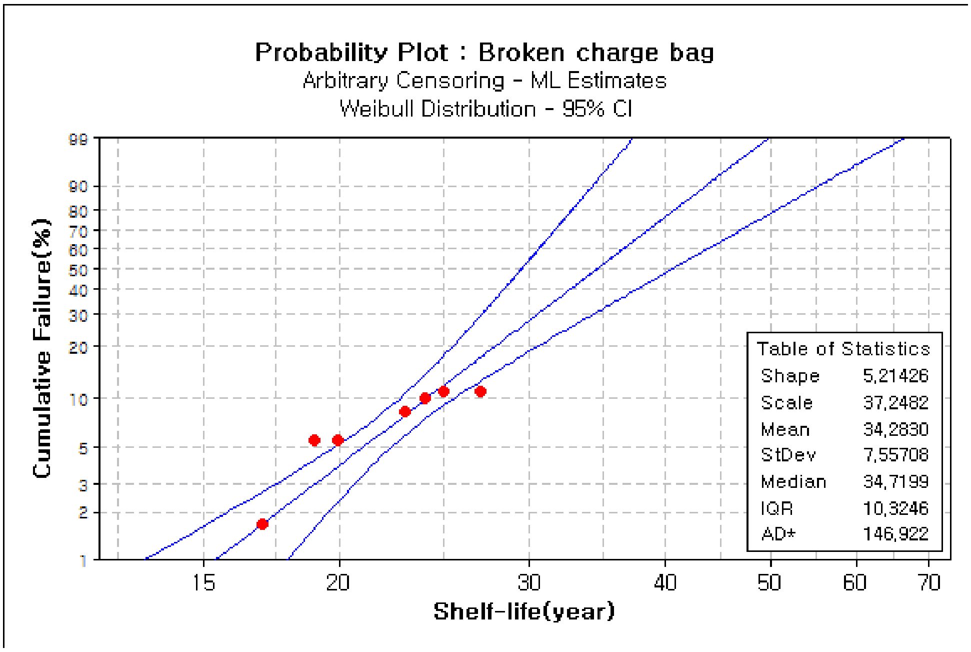

Table of Percentiles

Percent	Percentile	Standard Error	95.0% Normal CI Lower	95.0% Normal CI Upper
1	15.4156	1.18252	13.2637	17.9166
5	21.0726	0.645388	19.8449	22.3763
10	24.1921	0.710191	22.8394	25.6248
50	34.7199	2.85799	29.5469	40.7987

Figure 4. The shelf-life estimation result of broken charge bag by Minitab.

4.2 안정제 함량에 대한 저장수명 추정

탄약에서 성능발휘도 중요하지만 저장 및 운용 중에 안전이 보장되어야 한다. 탄약 구성품 중에는 장기저장에 따라 경시변화가 발생하고 이로 인해 안전상 위험을 초래하는 물질도 포함되어 있다. 추진제의 주요 성분인 NC는 저장 중 자연분해가 발생하고 자동촉매반응으로 인해 분해속도가 빨라지는 특징이 있다. 저장 추진제의 경우 안정제의 함

량을 측정하여 안정성 유지 정도를 가늠하고 있으며 안정제 함량이 0.3%미만으로 저하될 경우 조기에 불출하여 사용하고 0.2%미만인 경우에는 폐기토록 하고 있다. 그리고 안정제와 질소산화물의 반응은 0차와 1차반응이 혼합적으로 일어나지만 추진제의 저장성을 보장하는 측면에서 0차 반응을 적용하는 것이 적절(Lee, et al. 2007, 45-52)한 것으로 알려져 있고 0차 반응의 경우 안정제 함량 변화가 1차식으로 나타나므로 저장기간에 따른 안정제 함량의 변화를 1차 회귀직선으로 분석하였다.

Figure 5는 각 로트별 안정제 함량 시험데이터와 회귀분석 결과, 80% 신뢰구간, 80% 예측구간을 나타낸 그래프이다. 안정제 함량은 연간 약 0.0227%씩 저하되는 것으로 나타났다. 회귀분석식을 이용해서 안정제 함량이 0.3%에 이르는 수명을 계산해 보면 평균값 기준으로는 34.6년으로 추정되었다.

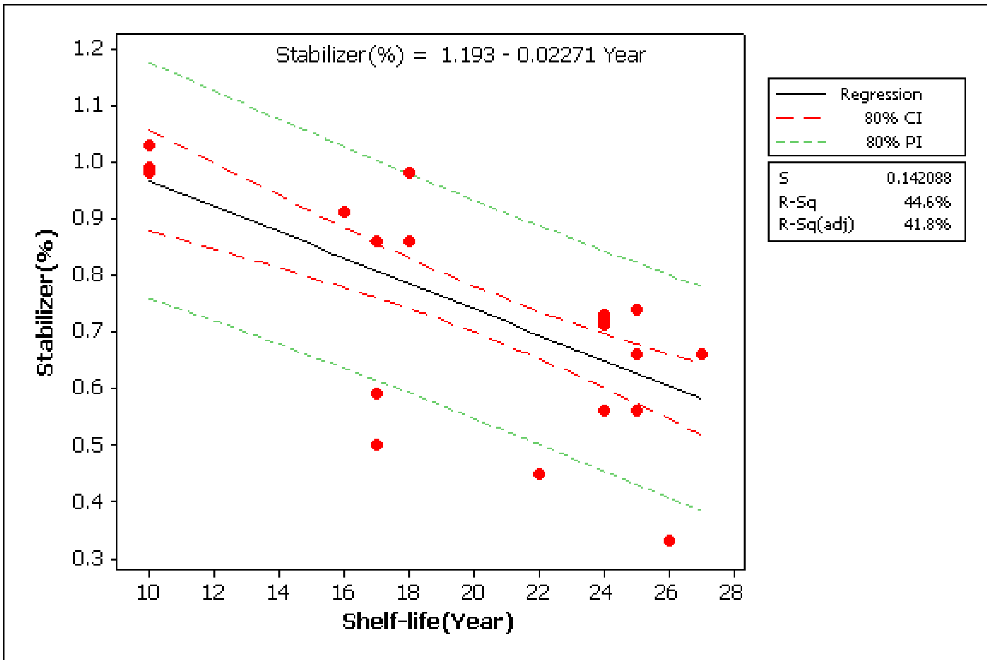

Figure 5. The result of regression analysis on stabilizer content of propellant.

5. 결 론

155MM 추진장약 KM4A2의 신뢰도 분석 및 저장수명을 추정할 목적으로 2005년~2013년간 수행한 ASRP평가결과를 종합하고 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, ASRP 평가결과를 종합한 결과 155MM 추진장약 KM4A2에서 저장 이후 발생하는 결점은 약포 파손, 인장강도 저하, 약포 변색, 탄속 불량, 안정제 함량의 저하 등이며, 이중 추진장약의 저장수명에 미치는 영향이 큰 결점은 약포파손과 안정제 함량 저하이다.

둘째, 추진장약의 약포 파손은 저장기간 17년 경과시부터 관찰되기 시작하며 전체적인 신뢰도는 약 95.3%이고 B_5 수명은 21.1년으로 추정되었다.

셋째, 추진제의 저장안정성을 판단하는 기준인 안정제 함량에 대한 회귀분석 결과, 연간 약 0.0258%씩 저하되는 것으로 나타났으며 안정제 함량이 0.3%에 이르는 수명을 계산해 보면 평균 34.6년으로 추정되었다.

따라서 155MM 추진장약 KM4A2의 신뢰도는 약포의 강도에 의해 결정됨을 알 수 있었고 저장수명을 연장하기 위해서 운영단계에서는 21년부터 비기능시험을 통해 약포파손 탄약을 선별하여야 하고, 개발/양산단계에서는 약포 수명 연장이 가장 시급한 것으로 판단되었다.

REFERENCES

Kim, Kwangsu, Jung, Jian, and Lee, JinGue. 1993. "A Comparative Study of the Results of the Regression Analysis by Linear Programming." Jouranl of the Korean Society for Quality Management 21(1):161-170.

Kim, Younghwa et al. 2007. The report on the ASRP's Activities in 2007, DTaQ-08-1693-T. Defense Agency for Technology and Quality.

Kim, Youngseub et al. 2010. Introduction to defense quality management. Hyungseul publishing network.

Koo, Weolseo et al. 2012. The report on the ASRP's Activities in 2009, DTaQ-12- 3616-T. Defense Agency for Technology and Quality.

Lee, Jongchan et al. 2007. "A study on the shelf-life prediction of the single base propellants using accelerated aging test." Journal of korean society for quality management 35(2):45-52.

Ministry of Defence. 2008. "Reliability and Maintainability(R&M) Assurance Activity Part 1 One-Shot Devices/ Systems." Defence Standard 00-42, Part 1, Issue 2.

Na, Sangeon et al. 2009. The report on the Army ASRP's Activities in 2009, DTaQ-10- 2235-T. Defense Agency for Technology and Quality.

Park, Dongseok et al. 2005. The report on the ASRP's Activities in 2003. DQAA-05-1213 -T. Defense Agency for Technology and Quality.

Park, Sangwon et al. 2013. The report on the ASRP's Activities in 2013, DTaQ-13-4111-T. Defense Agency for Technology and Quality.

Seo, Sunkeun. 2006. MINITAB Reliability analysis. Eretec Inc.

Sherwin, Edward R. 2004. "Analysis of "One-Shot" Devices", Selected Topics in Assurance Related Technologies 7(4):1-4.

Sim, hanggeun et al. 2009. "A study on the reliability analysis of one-shot system." Journal of the korea association of defense industry studies 16(2):105-116.

Yoon, Keunsig. 2013. The Reliability and Shelf-life Estimation on 155mm Propelling Charge M4 series, DTaQ-13-3774-R. Defense Agency for Technology and Quality.

Yoon, Keunsig, and Lee, Jongchan. 2012. "A Case Study on the Reliability Assessment of Stockpile Ammunition." Journal of the Korean Society for Quality Management 40(3):259-269.

Yoon, Keunsig et al. 2006. "A case study of Six Sigma for improving non-function test process in the ammunition stockpile reliability program." Journal of korean society for quality management 34(4):13-21.