

통계적 방법을 이용한 연료승압펌프의 신뢰도 예측

백낙곤* · 이형주* · 임진식*

Reliability Prediction of a Fuel Boost Pump using Statistical Methods

Nak-Gon Baek* · Hyung-Ju Lee* · Jin-shik Lim*

ABSTRACT

A Statistical methods are used to determine the reliability of a Fuel Boost Pump for aviation. Failures are referenced from failure reports. The failure-free periods between successive failure events are evaluated in the form of weibull distribution. The results of analysis were calculated shape factor, scale parameter and mean time to failure. It found that the reason of failure is wear-out period.

초 록

항공용 연료계통의 핵심부품인 연료승압펌프(FBP)의 신뢰도를 예측/평가하기 위하여 운용중에 지속적으로 발생하는 고장자료에 근거하여 고장추세분포를 도출하는데 Weibull Distribution 형태의 통계학적인 방법(Statistical Methods)을 사용하였다. 이를 토대로 하여 고장 자료분포를 시각적으로 분석하여 신뢰성 예측을 하였다. 분석결과, 형상모수(β), 척도모수(η) 및 평균고장시간(MTTF)을 산출하였다. 결과로부터 주요 고장원인이 기계부품의 마모나 노후화로 인하여 발생하는 마모고장기이며 산출된 평균고장시간 이전에 예방정비를 수행해야 사전에 고장을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

Key Words: Reliability(신뢰도), Fuel Boost Pump(연료승압펌프), 통계(Statistics), Weibull 분포

1. 서 론

현대 무기체계의 특징은 높은 신뢰성을 갖는 것이 특징이라고 할 수 있으며 그러므로 시스템 설계시에 신뢰성을 고려하여 설계하는 것이 무엇보다도 중요하다. 신뢰도(Reliability)는 보통 무기체계에서 흔히 사용되는 효율적 지수인 가

용도(Availability)를 나타내기 위하여 표현되는 하나의 시스템 특성이다. 신뢰도는 설계과정에서 발생하는 중요한 인자이며 본질적으로 정량적인 고유한 설계특성으로서 개념 설계처럼 초기에 시스템설계를 수행할 때 신뢰도를 최적으로 반영하여 무기체계 본래의 목적인 운용 가용도를 성취하여야 한다. 본 논문에서는 연료계통의 핵심부품인 연료승압펌프(Fuel Boost Pump, 이하 FBP)의 신뢰성자료를 기초로 하여 시스템의 안정성을 결정하는데 필요한 신뢰성의 예측에 중

* 국방과학연구소 1-5

† 교신저자, E-mail: baek100@add.re.kr

점을 두고 작성하였다. FBP는 동작하는 동안 정상적으로 작동할 확률은 가급적 높아야 하며 이 확률 수치는 시간이 경과함에 따라 신뢰성 저하의 특성으로 인해 FBP의 고신뢰도 요구조건을 달성하지 못할 수가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로는 생산/배치되는 동안에 관련된 자료를 수집, 분석함으로써 신뢰도의 정확한 평가를 한 후 신뢰성 증진을 위하여 노력하여야 한다. 보통 비행체의 가용도 요구사항을 만족하기 위하여 검사주기 평가 항목을 정의하여 FBP의 신뢰도에 대한 평가방안을 수립하여 배치/양산에 들어가기 전에 고장장비 대책을 세워야 한다. FBP의 신뢰도를 예측/평가하기 위하여 통계학적인 방법(Statistical Methods)을 사용하는 것이 보통이나 예산문제나 시험범위 등과 같은 제한적인 사항이 있어 통계적 기법에서의 신뢰도(Confidence level) 확보가 어려운 상태이다. FBP가 운용되는 한 고장은 반드시 발생하며 신뢰도를 달성하고자 하는 최종목표는 신뢰성을 평가하고 고장이 일어나기 전에 예방정비를 함으로써 FBP의 품질을 유지하는 방안을 수립하는 것으로 요약할 수 있다. 현재는, FBP가 양산/배치되어 운용시간이 짧아 FBP의 Field 운용 자료가 부족하여 타 무기체계에서 신뢰성 확보를 위하여 수집된 자료를 기준으로 하여 FBP의 신뢰도를 통계학적인 방법으로 예측하고 분석하였다.

2. 이론적 배경

통계는 어떤 평가로부터 도출된 결론을 간단하게 요약할 뿐만 아니라 향후에 시험할 신뢰성 있는 예측이 가능하게 한다. 물론 어떤 것이 확실하고 통계가 입증하는 것은 불가능하지만, 어떤 모델을 가지고 계산 할 때 문제를 단순화시키거나 미지의 세계에서 일어나는 현상의 특성을 알기 위해서는 보통 가정을 하는 것이 상례이다. 보통 신뢰도 예측(수명분포)에 사용되는 통계함수는 다음의 3가지가 사용을 한다.

첫째, 지수 분포(Exponential Distribution)의 형태로서 신뢰도라 함은 N 대의 기계가 저장된 후 시점 t에서 정상적으로 작동하는 개수가 n(t)이

라 하면, 신뢰도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N}$$

지수 분포는 제품의 고장률(λ)이 저장 시간에 관계없이 일정하다면, 신뢰도는 다음의 수학적식으로 표현한다.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N} = e^{-\lambda t}, \lambda = \frac{1}{MTBF}$$

여기서,

R = 규명된 임무의 성공확률

t = 임무시간

λ = 임무시간 동안의 고장률

이 방정식은 부품의 운용주기 동안에 λ 가 일정하다는 가정을 전제로 사용한다.

둘째, 정규 분포(Normal Distribution) 형태로서 노화 고장과 같이 사용시간 또는 사용회수의 증가에 따라 고장수가 증가하는 경우처럼 고장률(λ)이 저장 시간에 따라 증가하는 경우에 적용이 된다. 그 때 신뢰도는 아래와 같다.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N} = 1 - \Phi(z), \text{ where } \Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

여기서 Z 는 다음과 같다.

$$z = \frac{t - \mu}{\sigma} = \frac{1900 - 2000}{200} = -0.5$$

셋째, 와이블 분포(Weibull Distribution)의 형태로서 다양한 고장률을 적용할 수 있는 확률 분포로서 신뢰도의 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N} = \exp(-\lambda t)^\beta$$

여기서, β 는 형상모수(Shape Parameter)로서 아래와 같이 범위에 따라 다른 분포를 나타낼 수 있다.

- $\beta < 1$: 고장률 감소형(초기고장형)
- $\beta = 1$: 고장률 일정형(우발고장형)
- $\beta > 1$: 고장률 증가형(마모고장형)
- ✓ $1 < \beta < 4$: Low Cycle Fatigue, 부식, 마모 등의 고장인 경우
- ✓ $\beta > 4$: 노화(Aging)의 영향인 경우

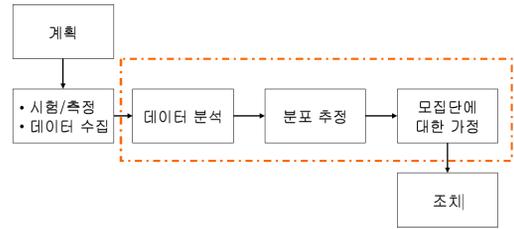


Fig. 3 신뢰성 자료 분석 절차

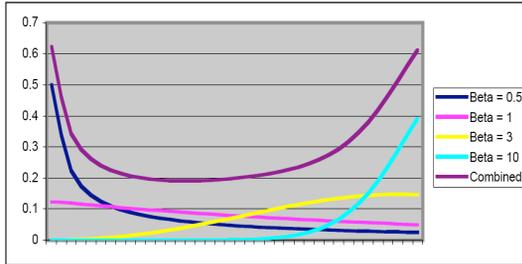


Fig. 1 와이블 분포

신뢰성 척도 와 관련된 와이블분포의 통계학적 수식은 다음과 같다.

	2 모수 와이블분포	3 모수 와이블분포
고장 밀도함수	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$
신뢰도 함수	$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$
고장률 함수	$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$
MTBF	$MTBF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$	$MTBF = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$

η : 척도모수(scale parameter), β : 형상모수(shape parameter)
 γ : 위치모수(location parameter), Γ : 감마 함수

Fig. 2 와이블 분포 함수식

3. 신뢰도 예측

신뢰도를 예측하기 위해서는 운용개념 및 동작성능 등과 같은 많은 자료획득이 중요하다. 신뢰성 자료를 분석하는 절차는 그림 3과 같다. 100개의 FBP를 운용하여 각 FBP에 대한 고장시간자료가 아래의 표 1처럼 측정되었다. 시간에 따른 누적분포함수는 그림 4와 같다.

Table 1 고장시간에 따른 고장률

고장시간(hr), t	Observed Frequency	Observed Cumul. Relative Freq. F(t)
1000 → 1100	2	0.02
1100 → 1200	6	0.08
1200 → 1300	16	0.24
1300 → 1400	14	0.38
1400 → 1500	26	0.64
1500 → 1600	22	0.86
1600 → 1700	7	0.93
1700 → 1800	6	0.99
1800 → 1900	1	1.00

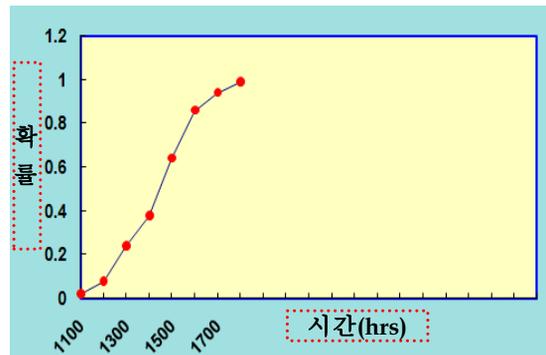


Fig. 4 시간에 따른 고장 확률

먼저 초기유발고장시간(Failure Free Time, γ)를 먼저 구하면, 시행착오, 그래프 및 컴퓨터프로그램에 의한 방법 중에서 세 번째 방법으로 구하면, 최적의 상관계수(Best Correlation Coefficient)를 구하기 위하여 몇 개의 γ 로 검정하면 최적의

상관계수, γ 는 900 시간이 산출된다. 고장 누적 분포도를 와이블함수로 주어지는데,

$$F(t) = 1 - \exp[-[(t - \gamma)/\eta]^\beta]$$

상기 식을 서로 이항하고 양변에 자연대수를 취하면, 다음 식으로 변형된다.

$$\text{Ln}[-\text{Ln}[1 - F(t)]] = \beta \text{Ln}(t - \gamma) - \beta \text{Ln}\eta$$

상기 식을 $Y = aX + b$ 의 형태의 1차식으로 서 다음의 표 2와 같이 회귀 직선식(linear Regression)으로 표현할 수 있다.

Table 2 선형식에서의 변수

t	F(t)	Y = Ln[-Ln[1 - F(t)]]	X = Ln(t - γ)
1100	0.02	-3.9019	5.2983
1200	0.08	-2.4843	5.7038
1300	0.24	-1.2930	5.9915
1400	0.38	-0.7831	6.2146
1500	0.64	0.0214	6.3969
1600	0.86	0.6761	6.5511
1700	0.93	0.9780	6.6846
1800	0.99	1.5272	6.8024
1900	1.00	-	-

여기서, 선형회귀식이 적용된 β 와 η 를 결정하기 위하여 β 는 기울기인 a 로 그리고 b 는 절편값을 같으며 아래의 식으로 표현된다.

$$a = \beta = n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i / [\sum_{i=1}^n X_i^2 - [\sum_{i=1}^n X_i]^2]$$

상기 식으로부터 $\beta = 3.6$ 값을 갖는다. 이는 측정된 데이터에서 형상모수가 1보다 크게 나왔으므로 고장률 함수는 단조 증가하는 함수를 가지고 있다고 할 수 있다.

Table 3 선형 회귀식에서의 중간 변수값

Y_i	X_i	Y_i^2	X_i^2	$X_i Y_i$
-3.9019	5.2983	15.2251	28.0722	-20.6737
-2.4843	5.7038	6.1719	32.5331	-14.1701
-1.2930	5.9915	1.6719	35.8976	-7.7472
-0.7381	6.2146	0.5447	38.6214	-4.5868
0.0214	6.3969	0.0005	40.9207	0.1370
0.6761	6.5511	0.4571	42.9167	4.4289
0.9780	6.6846	0.9566	44.6840	6.5379
1.5272	6.8024	2.3323	46.2726	10.3885
-5.2146	49.6432	27.3601	309.9183	-25.6855

선형계수 $-\beta \text{Ln}\eta$ 는,

$$b = -\beta \text{Ln}\eta = \sum_{i=1}^n Y_i / n - a \sum_{i=1}^n X_i / n = -22.8865$$

$$\eta = 594.28 \text{ hrs}$$

임을 알 수 있다.

그러므로, 위 식에서 구한 β 와 b를 대입하면 η 는 **592.66 hrs** 이다.

또한, 상관계수(r)을 아래의 식으로부터 0.9990을 얻을 수 있다.

$$r = n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i / [n \sum_{i=1}^n X_i^2 - [\sum_{i=1}^n X_i]^2][n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - [\sum_{i=1}^n Y_i]^2]$$

예를 들어, t = 1350시간에서의 펌프 고장확률 (Pump Failure Probability)은,

$$F(t) = 1 - \exp[-[(t - \gamma)/\eta]^\beta]$$

$$F(t) = 1 - \exp[-[(t - 900)/594.28]^{3.58}]$$

의 식에 앞에서 구한 β , η 값을 넣어 계산하면 F(1350)는 0.6911 이고 신뢰도 R(1350)은 0.3089 임을 알 수 있다. 이는 100개 중에서 약 30개가 고장이 난다는 것을 의미한다. 연료승압펌프의 수명이 와이블 분포를 따른다고 하면 MTTF는 다음의 감마함수식을 표현가능하다.

$$MTTF = \gamma + \eta\Gamma(1 + \beta^{-1}) = 1435.35 \text{ hrs}$$

표준편차(Standard Deviation, σ)는,

$$\sigma = \eta[\Gamma(1 + 2\beta^{-1}) - \Gamma^2(1 + \beta^{-1})]^{1/2}$$

$$\sigma = 594.28[\Gamma(1 + 2/3.58) - \Gamma^2(1 + 1/3.58)]^{1/2}$$

$$= 164.95 \text{ hrs}$$

또한, 변이계수(Variation Coefficient, VC)는,

$$VC = \sigma / MTTF - \gamma = 0.31$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp[-((t - 900)/594.28)^{3.58}]$$

동일한 방법으로 γ 가 200 ~ 900시간의 경우에 β 와 η 및 고장확률을 구하면 표 4,5 와 같다.

Table 4 γ 변화에 따른 β 와 η

γ	200	400	600	800	900
β	9.17	7.64	6.08	4.46	3.60
η	1318.01	1114.40	909.01	700.02	592.66

Table 5 γ 변화에 따른 고장 확률

γ t	F(t)	200	400	600	800	900
1100	0.02	0.0298	0.0283	0.0261	0.0226	0.0199
1200	0.08	0.0764	0.0764	0.0769	0.0791	0.0827
1300	0.24	0.1734	0.1776	0.1847	0.1998	0.2158
1400	0.38	0.3449	0.3541	0.3687	0.3951	0.4187
1500	0.64	0.5858	0.5956	0.6098	0.6321	0.6484
1600	0.86	0.8244	0.8280	0.8324	0.8370	0.8380
1700	0.94	0.9622	0.9610	0.9588	0.9535	0.9473
1800	0.99	0.9973	0.9967	0.9955	0.9926	0.9888
1900	1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

표 5 에 대한 결과는 그림 2와 같으며 γ 변화에 따른 표준편차(SD)는 표 6 과 같다.

Table 6 γ 변화에 따른 표준 편차

γ	t - γ	표준편차
200	1249.19	162.71
400	1047.09	162.11
600	843.90	161.67
800	638.47	162.44
900	534.01	164.95

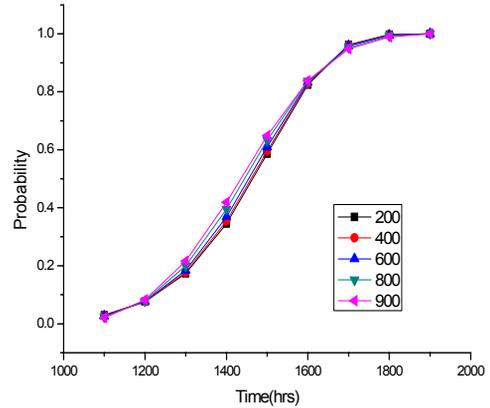


Fig. 5 γ 및 시간에 따른 고장확률 분포

4. 결 론

항공용 연료계통의 핵심부품인 연료승압펌프(FBP)의 신뢰도를 예측/평가하기 위하여 운용중에 지속적으로 발생하는 고장자료에 근거하여 고장추세분포를 도출하는데 Weibul Distribution 형태의 통계학적인 방법(Statistical Methods)을 사용하였다. 이를 토대로 하여 고장 자료분포를 시각적으로 분석하여 신뢰성 예측을 하였다. 분석결과, 형상모수(β), 척도모수(η) 및 평균고장시간(MTTF)을 산출하였다. 결과로부터 주요 고장원인이 기계부품의 마모나 노후화로 인하여

발생하는 마모고장기이며 산출된 평균고장시간 이전에 예방정비를 수행해야 사전에 고장을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 송근우, 최석철, "통계적 방법을 이용한 항공기 정비인력산정", 한국군사운영분석학회지, 제26권 제1호,2000.6,pp70
2. 이한규, 최진희, "RAM 용소설계 목표값 연구", 한국군사과학기술학회지 제3권 제1호,2000.7,PP218
3. Hans-Hermann Molter, "Reliability Investigations on an Automatic Test System", pp27-1~27-13