

# 가속수명시험을 이용한 원샷 시스템의 신뢰도 추정방법 비교

손영갑<sup>1\*</sup> · 장현정<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 기계자동차공학과 / <sup>2</sup>안동대학교 기계공학과

## Comparison of Reliability Estimation Methods for One-shot Systems Using Accelerated Life Tests

Young Kap Son<sup>1</sup> · Hyun Jung Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Andong Nat'l University

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l University

This paper shows accuracy comparison results of reliability estimation methods for one-shot systems with respect to sample sizes. To compare accuracy in reliability estimation methods, quantal-response data, characterizing one-shot systems, were simulated using failure times of LED obtained through the accelerated life test, and then the true reliability over time was evaluated using the failure times. The simulated quantal-response data were used to estimate the true reliability through applying reliability estimation methods in open literature. Accuracy of each reliability estimation method was compared in terms of both SSE (Sum of Squared Error) and MSE (Mean Squared Error), and then estimation trend for each method is found. Feasible bounds which true reliability would exist within were estimated through applying the found trends to quantal-response data set of a real weapon system.

**Keywords:** Accelerated Life Test, One-shot System, Quantal-Response Data, Reliability Estimation

### 기호설명

SSE	: Sum of Squared Error
MSE	: Mean Squared Error
$t_i$	: 가부반응 데이터 확보 시점
$R(t_i), \hat{R}(t_i)$	: 참값 신뢰도와 추정 신뢰도
$m(t_i), n(t_i)$	: 추출 샘플수와 실패 수
N	: 비모수 추정법의 비누적법
C	: 비모수 추정법의 누적법
P	: 모수 추정법
B	: 베타분포를 사전분포로 하는 베이지안법
NB	: 정규분포를 사전분포로 하는 베이지안법
SB	: 결측 균일분포를 사전분포로 하는 베이지안법

### 1. 서론

일반적인 운용 시스템은 고려된 범위 안에 존재하는 고장시간 데이터를 처리하여 신뢰도를 평가하고, 고장 발생 시 정비(maintenance)를 통해 다시 정상적으로 운용되며 주기적인 점검을 통해 시스템의 성능을 재평가 할 수 있다(Son *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2004). 그러나 탄약, 미사일, 우주발사체, 소화기, 자동차용 에어백 등과 같이 1회 사용 후 임무를 완료하는 원샷(One-shot) 시스템은 임의의 시점에서 샘플링(sampling)한 가부반응(Quantal-response)데이터, 즉 성공 혹은 실패 데이터를 이용하여 신뢰도를 평가하며, 원샷 시스템의 신뢰도는 각 시점에서의 성공확률 즉, 성공수/추출수로 정의된다(Guikema, 2005; Zheng *et al.*, 2004). 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0064353).

\* 연락처 : 손영갑 교수, 760-749 경북 안동시 송천동 388번지 안동대학교 기계자동차공학과, Tel : 054-820-5907, Fax : 054-820-5044,

E-mail : ykson@andong.ac.kr

2010년 5월 27일 접수; 2010년 8월 25일 수정본 접수; 2010년 8월 27일 게재 확정.

정하는 경우, 초기의 전체 시료에서 고려되는 샘플링 시점까지의 정상 동작하는 샘플 수를 정확하게 평가하기 어렵다. 또한 한 번의 성능평가로 더 이상 동작하지 못하기 때문에 정상적으로 동작한 샘플에 대해서는 예상되는 고장 시점을 정확히 알 수 없다. 그러므로 추출되지 않은 샘플에 대한 성공/실패 여부를 파악하기 어렵기 때문에 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도 추정을 수행하는데 많은 어려움이 존재한다.

<Figure 1>은 본 연구에서 수행한 LED에 대한 가속수명시험을 통해 확보한 고장시간 데이터로부터 평가한 시점별 참값 신뢰도와 각 시점에서 추출한 샘플 수 10, 20개의 가부반응 데이터를 이용하여 비모수 추정법의 비누적법을 적용하여 추정한 성공확률을 나타낸다.

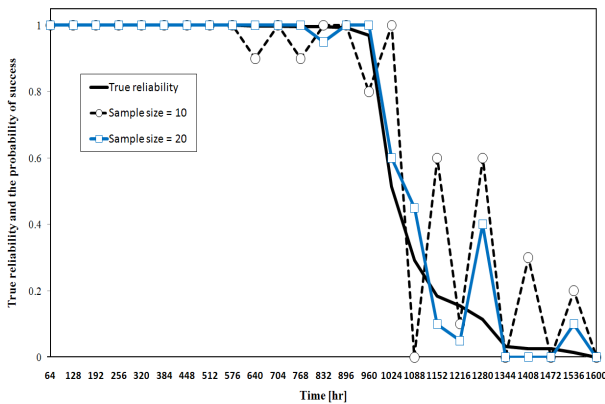


Figure 1. True reliability and the probability of success for different sample sizes

일반적인 추정방법은 샘플 수 증가에 따라 참값에 가까운 추정량을 제공하지만 <Figure 1>과 같이 가부반응 데이터를 이용하는 신뢰도 추정은 샘플 수가 10에서 20으로 증가함에 따라 정확성이 증가되지 않는 경향을 나타낼 수 있기 때문에 신뢰도 추정이 매우 어렵다. 그러나 각 시점에서 추출한 샘플 수가 100개 이상인 경우에는 샘플 수가 증가할수록 정확성이 증가하는 경향을 나타낸다고 평가할 수 있다. 미사일과 같은 원샷 시스템은 가격이 비싸고 1회 사용 후 폐기되어야 하기 때문에 경제적인 측면에서 샘플 수에 대한 제한이 존재한다. 따라서 원샷 시스템의 신뢰도 추정에 대한 연구가 매우 미진한 실정이다.

Guikema는 시간에 따른 참값 신뢰도 프로파일(profile)이 크게 시간에 따라 신뢰도 증가, 감소, 일정하다고 가정하여 가부반응 데이터를 모사하였다. 또한 문헌에 공개된 2가지 비모수 추정법, 베이지안법에 근거를 둔 3가지 추정법을 적용하여 각 추정방법에 대한 SSE 크기를 비교함으로써, 전체 시간에 대한 추정된 신뢰도의 정확성을 비교하였다(Guikema, 2005). Son et al.은 수명분포의 모수들을 가정하여 가부반응 데이터를 모사하고 비모수 추정법과 모수 추정법, 베이지안법의 정확성을 비교하였다(Son et al., 2009). 또한 Back et al.은 실제 원샷 시스

템의 가속수명시험을 수행하여 확보한 가부반응 데이터에 모수 추정법을 적용하여 필드환경에서의 신뢰도를 추정한 결과를 제시하였다(Back et al., 2009).

본 논문에서는 LED를 이용한 가속수명시험을 수행하여 고장시간 데이터를 이용하여 추정해야 하는 참값 신뢰도를 정의하고 가부반응 데이터를 모사(simulation)한다. 모사한 가부반응 데이터에 문헌에 공개된 6가지 추정방법들을 적용하여 신뢰도를 추정하고 각 방법의 SSE와 MSE를 평가하여 정확성을 비교한다. 추정 신뢰도 값이 가부반응 데이터에 따라 변화하기 때문에, 추출 샘플수와 반복수 변화를 고려하여 다양한 가부반응 데이터에 대한 추정방법들의 정확성을 고찰한다. 또한 MSE를 이용하여 6가지 방법들의 시간에 따른 추정 경향성을 도출하여, 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터에 적용함으로써 참값 신뢰도가 존재하는 범위를 추정할 것이다.

## 2. 신뢰도 추정방법과 정확성 비교방법

### 2.1 신뢰도 추정방법

문헌에 공개된 원샷 시스템의 신뢰도 추정방법은 비모수 추정법, 모수 추정법, 베이지안 추정법으로 나눌 수 있다. 비모수 추정법은 각 시점에서의 가부반응 데이터만을 이용하여 신뢰도를 추정하는 방법이며 비누적법(N)과 누적법(C)으로 구분된다(Guikema, 2005; Nelson, 1892). N과 C를 이용한 신뢰도 추정은 식 (1)과 식 (2)로 각각 정의된다.

$$\hat{R}(t_i) = 1 - n(t_i)/m(t_i) \quad (1)$$

$$\hat{R}(t_i) = 1 - \left( \frac{\sum_{j=1}^i n(t_j)}{\sum_{j=1}^i m(t_j)} \right) \quad (2)$$

예를 들어, 시점  $t_0$ 와  $t_1$ 에서 추출한 샘플수가 각각  $m(t_0)$ ,  $m(t_1)$ 이고 추출한 샘플 중에 실패한 샘플 수가  $n(t_0)$ 와  $n(t_1)$ 인 경우, N 방법을 적용하여 추정된 시점  $t_1$ 에서의 신뢰도는  $1 - (n(t_1)/m(t_1))$ 이며, C 방법을 적용하여 추정된 신뢰도는  $1 - [(n(t_0) + n(t_1))/(m(t_0) + m(t_1))]$ 이다.

모수 추정법(P)은 수명 분포를 가정하여, 이항분포 특성을 나타내는 가부반응 데이터로 표현되는 우도함수를 최대화하는 수명분포 모수를 구하여 신뢰도를 추정하는 방법이다(Son et al., 2009; Zheng et al., 2004). 가정한 수명분포의 모수를  $\theta$ , 신뢰도함수를  $R(t, \theta)$ 라 두면,  $\theta$ 를 추정하기 위한 우도함수는

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^k m(t_i) C_{n(t_i)} \{1 - R(t_i, \theta)\}^{n(t_i)} \{R(t_i, \theta)\}^{m(t_i) - n(t_i)} \quad (3)$$

따라서 우도함수를 최대로 하는  $\theta$ 를 구하여,  $\theta$ 의 함수로 표

현되는 신뢰도를 평가하는 방법이 모수 추정법이다.

베이저안 추정법은 베이즈 정리(Bayes' theorem)를 이용하여 추정할 신뢰도에 대한 사전분포(Prior Distribution)를 가정하고 가부반응 데이터를 이용하여 우도함수를 평가함으로써 사후분포(Posterior Distribution)를 구하고, 사후분포에 대한 기대값(Expected value)을 구하여 신뢰도를 추정하는 방법이다(Guikema, 2005; Guikema and Pate-Cornell, 2004; Hamada *et al.*, 2008). 원샷 시스템의 신뢰도를 추정하기 위하여 사용된 사전분포는 베타분포, 정규분포, 결측 균일분포이다. 시점  $t_i$ 에서 추정할 신뢰도 값을  $R(t_i)$ 로 정의하면, 각각의 사전 분포에 대한 정의는 모수  $a$ 와  $b$ 를 가지는 베타분포의 경우,

$$g(R(t_i)) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} R(t_i)^{a-1} (1-R(t_i))^{b-1} \quad (4)$$

여기서  $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수(Gamma function)를 나타낸다. 모수  $\mu(t_i)$ 와  $\sigma(t_i)$ 를 가지는 정규분포의 경우,

$$g(R(t_i)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t_i)} \exp\left(-\frac{(R(t_i)-\mu(t_i))^2}{2\sigma(t_i)^2}\right) \quad (5)$$

시점  $t_{i-1}$ 에서 추정된 신뢰도 값  $\hat{R}(t_{i-1})$ 에 대하여 결측 균일분포의 경우,

$$U(R(t_i), \hat{R}(t_{i-1})) = \begin{cases} \frac{1}{\hat{R}(t_{i-1})} & 0 \leq R(t_i) \leq \hat{R}(t_{i-1}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

미전략사령부(US Air Force Strategic Command)에서 식 (6)에 정의된 결측 균일분포를 이용하여 미사일 등의 신뢰도를 추정하고 있다. 또한 사전분포와 무관하게 베이저안법의 우도함수는 식 (7)로 정의된다.

$$l(m(t_i), n(t_i) | R(t)) = {}_{m(t_i)}C_{m(t_i)-n(t_i)} \times R^{m(t_i)-n(t_i)} (1-R)^{m(t_i)} \quad (7)$$

각각의 사전분포와 식 (7)에 정의된 우도함수를 이용하여 식 (8)로 정의되는 사후분포함수를 구하여 사후분포함수에 대한 기대값(expected value)을 평가하여 신뢰도를 추정한다.

$$h(R(t_i) | m(t_i), n(t_i)) = \frac{l(m(t_i), n(t_i) | R(t_i))g(R(t_i))}{\int_0^1 l(m(t_i), n(t_i) | R(t_i))g(R(t_i))dR(t_i)} \quad (8)$$

사전분포가 정규분포 및 결측 균일분포인 경우, 시점  $t_{i-1}$ 에서 추정된 모수와 신뢰도 값이 시점  $t_i$ 에서의 사전분포를 결정한다. 식 (8)에 정의된 사후분포함수에 대하여 기대값을 평가하는 경우,  $R(t)$ 에 대한 적분이 필요하기 때문에 수치적인 근사화 적분방법을 적용한다(Steven *et al.*, 2008).

## 2.2 각 방법론 비교 방법

### 2.2.1 전체 시점에서의 오차를 고려한 방법

고려한 시점  $T$ 까지의 전체 시점에서의 오차를 나타내는 SSE는 추정해야 할 참값 신뢰도를  $R(t_i)$ 라 두면, 식 (9)로 정의된다.

$$SSE = \sum_{i=1}^T (R(t_i) - \hat{R}(t_i))^2 \quad (9)$$

또한 추정방법들의 상대적인 정확성 비교를 위하여 고려된 신뢰수준에서 식 (10)으로 정의되는 SSE 차이에 대한 t-검정을 수행한다.

$$Z_i = SSE_{1i} - SSE_{2i} \quad (10)$$

여기서  $i$ 는 반복수를  $Z$ 는 고려된 두 방법(예. 1과 2 방법)에 대한 SSE 차이이다. 고려된 신뢰수준에서 t-통계량이 0을 포함하면 두 방법의 SSE는 차이가 없기 때문에 정확성이 동일하다고 판단하였다. 본 연구에서는 다양한 가부반응 데이터 수(추출 샘플 수)와 반복수에 대한 6가지 방법의 정확성을 상대적으로 비교한다.

### 2.2.2 각 시점별 정확성 비교

가부반응 데이터를 확보한 모든 시점에서의 참값 신뢰도와 추정 신뢰도의 차이에 대한 제곱을 나타내는 SSE는 식 (11)로 정의되는 각 시점에서의 MSE에 대한 합과 동일하다(Van den Bos, 2007).

$$MSE(\hat{R}(t_i)) = E[\hat{R}(t_i) - R(t_i)]^2 = V[\hat{R}(t_i)] + (bias)^2 \quad (11)$$

여기서,  $bias$ 는  $R(t_i)$ 와  $\hat{R}(t_i)$ 의 차이를 나타내며,  $V[\hat{R}(t_i)]$ 는 추정 신뢰도값에 대한 분산을 나타낸다.

MSE 크기가 작다는 것은 추정량의 분산과 편의가 작다는 것으로 추정량이 모수의 값에 근접하다는 것을 나타내므로 크기가 가장 작은 MSE 값을 제공하는 추정법이 정확성이 가장 높은 추정법이라 할 수 있다. 또한 식 (11)에서 작은 편의가 존재하더라도 분산이 작은 추정량을 제공하는 추정법이 좋은 추정법이라 평가할 수 있다. 본 연구에서는 각 추정방법들의 시간에 따른 신뢰도 추정 경향성을 MSE를 이용하여 도출한다.

## 3. 가속수명시험 데이터를 이용한 신뢰도 추정방법 비교

### 3.1 가부반응 데이터 모사

원샷 시스템의 가부반응 데이터를 모사하고 참값 신뢰도를 평가하기 위하여 가속수명시험을 실시하였다. <Figure 2>에

제시된 것처럼 80mW급 LED(Light Emitting Diode) 500개를 시료로 85[°C], 85[%RH] 조건에서 30[mA] 전류를 인가하여 가속 수명시험을 실시하였으며, 64시간을 주기로 LED에 대한 고장 유무를 평가하였다. 고장시간들을 이용하여 평가한 참값 신뢰도를 <Figure 1>에 제시하였다.



Figure 2. LED accelerated life test

640시간을 시작으로 1152시간까지 64시간을 주기로 하여 총 10개의 가부반응 데이터 확보 시점을 나타내는 샘플링 시점을 선정하였다. 또한 샘플링 시점에서 추출한 샘플 수는 1, 2, 4, 8, 10, 20, 40개이고, 수행한 반복수는 100, 500, 1000, 5000, 15000이다. 500개의 시료를 총 10개의 샘플링 시점에서 동일한 샘플 수로 추출하고, 또한 샘플 수가 작은 경우에 대한 각 추정 방법의 정확성을 비교하기 위해서 추출 샘플 수를 40개 이하로 고려하였다. 각 샘플링 시점에서의 추출 샘플 수에 대한 성공 수와 실패 수는 총 고장시간 데이터를 랜덤으로 추출하여 정렬한 후에 고려한 샘플 수 S개만큼 고장시간들을 그룹화하고, 그룹화 된 고장시간이 고려된 샘플링 시점보다 크면 성공으로, 작으면 실패로 정의하여 성공 수와 실패 수를 평가하였다. <Table 1>은 추출 샘플 수 3에 대하여 각 시점에서의 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 모사한 결과를 나타낸다.

Table 1. Simulated quantal-response data using LED failure times

Time	Failure times	Success	Fail	m(ti), n(ti)
640	1003	1	0	3, 0
	1086	1	0	
	996	1	0	
704	1006	1	0	3, 0
	1062	1	0	
	1295	1	0	
:	:	:	:	:
1152	1003	0	1	3, 3
	1003	0	1	
	996	0	1	

### 3.2 가부반응 데이터를 이용한 방법론 비교

모사한 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도 추정을 수행하기 위하여, P 방법은 수명분포가 2모수-와이블분포를 따른다고 가정하였다. 베이지안법은 크게 B, NB, SB법을 적용하였으며, B는 베타분포 B(1, 1)을 사전분포로, NB는 정규분포 N(0.8, 0.08<sup>2</sup>)을 사전분포로, SB는 결측 균일분포를 사전분포로 가정하였다.<sup>(2)</sup>

6가지 추정방법을 이용하여 고려한 샘플 수와 반복수에 대하여 신뢰도를 추정하여 SSE 평가하였다. 반복수가 15,000인 경우, 샘플 수에 대한 SSE의 평균과 분산을 <Table 2>에 나타내었다. 또한 각 방법의 SSE 차이가 있는지를 평가하기 위해 총 15번의 t-검정을 실시하였다. <Table 3>은 반복수가 15,000인 경우, 샘플 수 1, 10, 40에 대한 90% 신뢰수준에서의 신뢰구간을 나타낸다.

Table 2. Mean and variance of SSE

sample size	Estimation methods					
	N	C	P	B	NB	SB
1	0.7857	1.1655	0.2749	1.1846	1.2949	3.4094
	(0.2073)	(0.1152)	(0.0632)	(0.0586)	(0.0046)	(0.0057)
2	0.3974	1.1426	0.1854	1.1276	1.2841	2.5139
	(0.0640)	(0.0567)	(0.0176)	(0.0396)	(0.0053)	(0.0071)
4	0.1956	1.1366	0.1369	1.1100	1.3113	1.4606
	(0.0163)	(0.0276)	(0.0046)	(0.0228)	(0.0046)	(0.0059)
8	0.0967	1.1309	0.1161	1.1083	1.4057	0.6430
	(0.0042)	(0.0138)	(0.0015)	(0.0125)	(0.0034)	(0.0033)
10	0.0774	1.1301	0.1115	1.1099	1.4502	0.4755
	(0.0028)	(0.0110)	(0.0010)	(0.0101)	(0.0031)	(0.0022)
20	0.0375	1.1280	0.1030	1.1153	1.6025	0.1708
	(0.0006)	(0.0051)	(0.0004)	(0.0049)	(0.0022)	(0.0005)
40	0.0182	1.1269	0.0992	1.1197	1.7394	0.0565
	(0.0002)	(0.0023)	(0.0001)	(0.0023)	(0.0015)	(0.0001)

Table 3. Confidence intervals for different sample sizes

	sample size					
	1	10	40	10	40	40
N, C	-0.39	-0.37	-1.06	-1.05	-1.11	-1.11
N, P	0.50	0.52	-0.04	-0.03	-0.08	-0.08
N, B	-0.41	-0.39	-1.03	-1.03	-1.10	-1.10
N, NB	-0.52	-0.50	-1.37	-1.37	-1.72	-1.72
N, SB	-2.63	-2.61	-0.40	-0.40	-0.04	-0.04
C, P	0.88	0.90	1.02	1.02	1.03	1.03
C, B	-0.02	-0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
C, NB	-0.14	-0.12	-0.32	-0.32	-0.61	-0.61
C, SB	-2.25	-2.24	0.65	0.66	1.07	1.07
P, B	-0.92	-0.90	-1.00	-1.00	-1.02	-1.02
P, NB	-1.03	-1.01	-1.34	-1.34	-1.64	-1.64
P, SB	-3.14	-3.13	-0.37	-0.36	0.04	0.04
B, NB	-0.11	-0.11	-0.34	-0.34	-0.62	-0.62
B, SB	-2.23	-2.22	0.63	0.64	1.06	1.06
B, SB	-2.12	-2.11	0.97	0.98	1.68	1.68

<Table 3>에 제시된 모든 신뢰구간에서 0을 포함하는 구간이 없으므로 6개 추정방법들의 정확성에 차이가 있다. <Table 3>에서 샘플 수 40에 대하여 SSE의 크기를 순서대로 나열하면 NB > C > B > P > SB > N 순이다. 반복수가 15,000인 경우에, 다양한 샘플 수 변화에 따른 SSE 순서를 <Table 4>에 나타내었다. 이러한 SSE 순서는 반복수 변화에 무관하다.

**Table 4.** SSE comparison for different sample sizes

SSE	sample size						
	1	2	4	8	10	20	40
larger	SB	SB	SB	NB	C	NB	NB
	NB	NB	C	C	NB	C	C
↓	B	C	B = NB	B	B	B	B
	C	B		SB	SB	SB	P
	N	N	N	P	P	P	SB
smaller	P	P	P	N	N	N	N

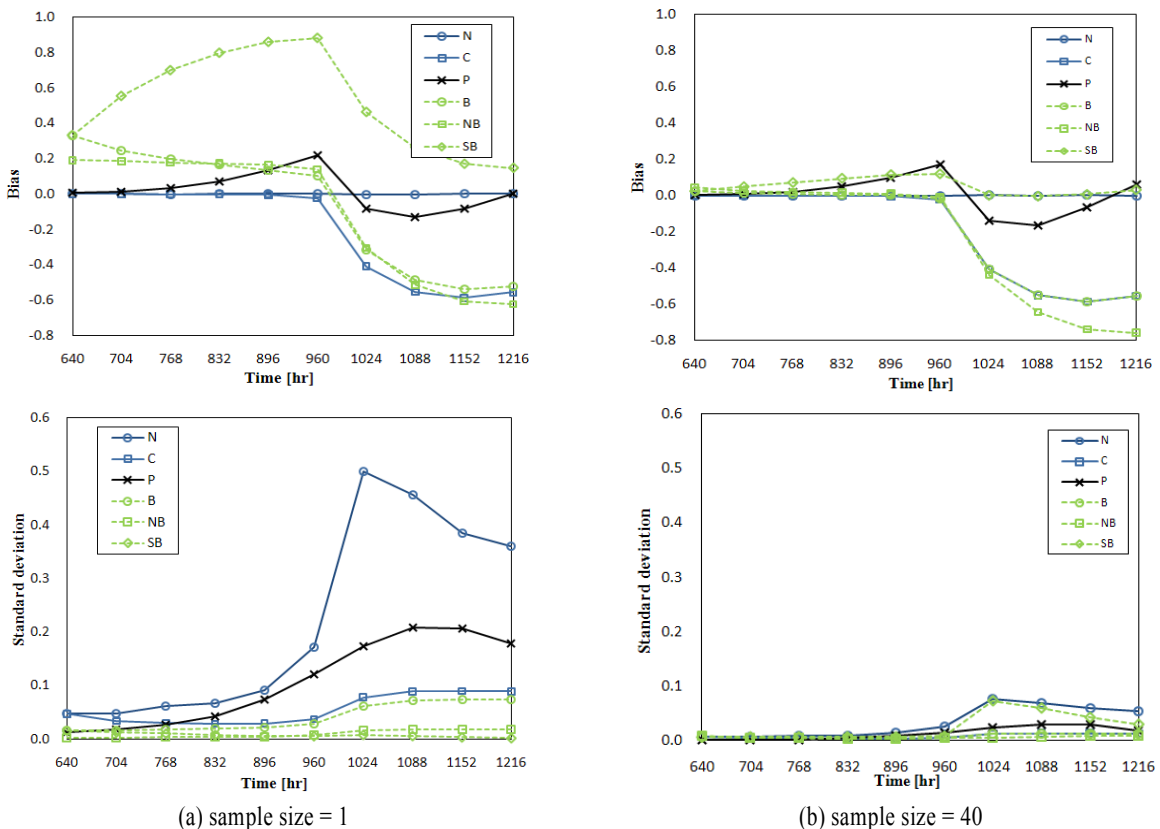
<Table 4>로부터 샘플 수가 많아짐에 따라 다른 방법에 비해 가장 큰 SSE 차이를 보이는 것은 SB이다. SB는 샘플 수가 1일 때 SSE가 가장 크다가 샘플 수가 커짐에 따라 점점 작아져 샘플 수 40에서 N 다음으로 작다. N과 P의 경우 모든 샘플 수에 대해 전반적으로 SSE가 크기가 작다. NB인 경우, 신뢰도 변

화율이 0.998에서 0.154로 급격히 변화하기 때문에 샘플 수에 무관하게 정확성이 가장 낮았다. Guikema은 신뢰도가 0.9에서 0.8로 미소하게 변화하는 경우에 NB의 정확성이 가장 높다고 평가하였지만(Guikema, 2005), NB는 신뢰도 변화율이 큰 경우에 정확성이 매우 낮음을 확인할 수 있다. N의 경우, P와 유사하게 다른 방법에 비해 정확성이 우수하지만 <Table 2>로부터 SSE의 분산이 P보다 크기 때문에 P가 모든 샘플 수에 대하여 정확성이 가장 우수하다고 평가할 수 있다.

추정방법들의 시간에 따른 경향성을 파악하기 위하여 각 시점별 편의와 표준편차를 평가하였다. <Figure 3>은 샘플 수 1, 40에 대한 시점별 편의와 표준편차를 나타낸다.

N과 P는 편의가 시점에 따라 양 또는 음의 값을 가지며 C, B, NB는 신뢰도가 급격히 변화하는 시간인 960 이전에는 양의 값을 가지지만 급격한 신뢰도 변화를 나타내는 시점 이후에는 음의 값을 가지는 경향이 있으며 시간이 지남에 따라 편의가 점점 증가하는 특성을 나타낸다. 또한 C와 B는 모든 시점에서 동일한 편의와 표준편차를 나타내기 때문에 두 방법에 의한 신뢰도 추정결과가 유사하다고 평가할 수 있다. SB는 모든 시점에서 편의가 양의 값을 가진다. 따라서 C, B, NB에 의한 신뢰도 추정은 시점이 증가함에 따라 참값 신뢰도를 과대추정(over-estimation), SB는 과소추정(underestimation)하는 경향성을 나타낸다.

각 시점별 편의와 표준 편차에 대한 분석으로부터, N의 경



**Figure 3.** Bias and standard deviation over time for each estimation method

우 추정된 신뢰도 값들에 대한 표준편차가 SSE 크기에 영향을 주지만 C, B, NB, SB는 편이가 SSE 크기에 영향을 준다. SB는 샘플 수 증가에 따라 C, B, NB와는 달리 편이가 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 P는 편이와 표준편차 모두 SSE 크기에 영향을 미치고 있다. 그러나 P의 경우, 샘플 수 증가에 따라 편이 변화가 미소하여 무시할 수 있으며 표준편차가 감소하는 경향을 나타낸다. N의 경우, 모든 시점에서 편이가 미소하지만 표준편차가 다른 방법에 비해 가장 크기 때문에 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추정하는 경우 많은 신뢰도 추정 오차를 유발할 수 있다. SB는 과소추정하는 경향을 나타내기 때문에 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추정하는 경우, 6가지 방법들 중 가장 낮게 참값 신뢰도를 추정한다. 따라서 SB는 worst-case를 고려한 신뢰도 추정방법이라고 평가할 수 있다. 또한 C, B, NB는 시점이 증가함에 따라 참값 신뢰도를 과대추정하는 경향을 나타내기 때문에 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추정하는 경우, 시점이 증가함에 따라 참값 신뢰도보다 큰 신뢰도 값을 추정한다고 평가할 수 있다.

MSE 분석으로부터 도출한 각 방법에 대한 경향성을 검증하기 위하여 <Figure 1>에 제시된 성공확률을 나타내는 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추정한 결과를 <Figure 4>와 <Figure 5>에 나타내었다.

B, NB, C는 시간이 증가함에 따라 참값보다 높게 신뢰도를 추정하였으며, SB는 샘플 수 20에서 시점 1088을 제외한 모든 시점에서 참값보다 낮게 신뢰도를 추정하였다. 식 (9)로 표현되는 SSE의 크기를 비교한 결과, 샘플 수 10인 경우에 SSE 크기는  $P < N < SB < B < C < NB$  순이다. 샘플 수 20인 경우에, SSE 크기는  $N < P < SB < B < C < NB$  순이다.

<Figure 3>에 나타낸 것처럼 신뢰도 추정량에 대한 표준편차는 N이 다른 방법에 비해 크고, <Figure 4>와 <Figure 5>로부터 시간이 증가함에 따라 신뢰도가 감소하는 일반적인 원샷 시스템의 경우, SB와 P의 방법이 다른 방법에 비해 정확성이 높다고 평가할 수 있다. 또한 시간에 따른 참값 신뢰도의 변화가 급격히 존재하는 경우에는 SB에 의한 신뢰도 추정이 다른 방법에 비해 정확성이 높다고 평가할 수 있다.

3.3 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터 적용 결과

SSE와 MSE에서 도출한 각 방법의 추정 경향성을 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터에 적용하여 참값 신뢰도를 추정하였다. Table 5<sup>(1)</sup>는 무기체계의 저장 신뢰성 평가를 위해 가속수명시험을 수행하여 구한 가부반응 데이터를 나타낸다.

Table 5. Quantal-response data for a weapon system (Back et al., 2009)

Storage time [day]	m(t)	n(t)
0	12	0
8	19	0
16	19	0
24	19	2
32	19	2
39	19	2
46	19	8
53	19	7
⋮	⋮	⋮
102	19	10
109	19	15
116	19	18

<Table 5>에서 성공확률은 추출한 샘플 중에서 성공한 샘플 수를 추출한 샘플 수로 나눈 값을 나타내며, N 방법에 의해 추

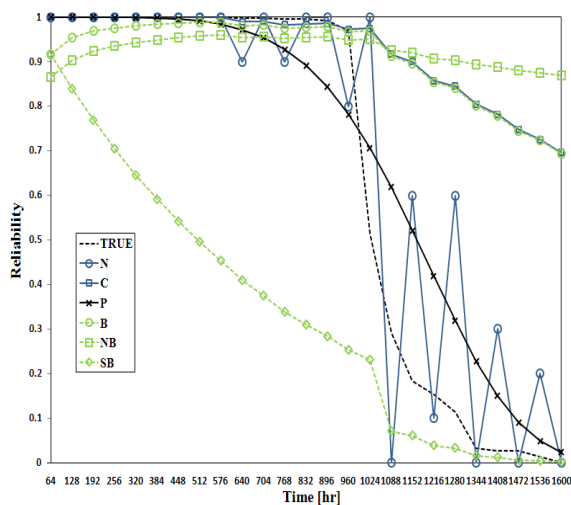


Figure 4. Reliability estimation results for quantal-response data (sample size = 10)

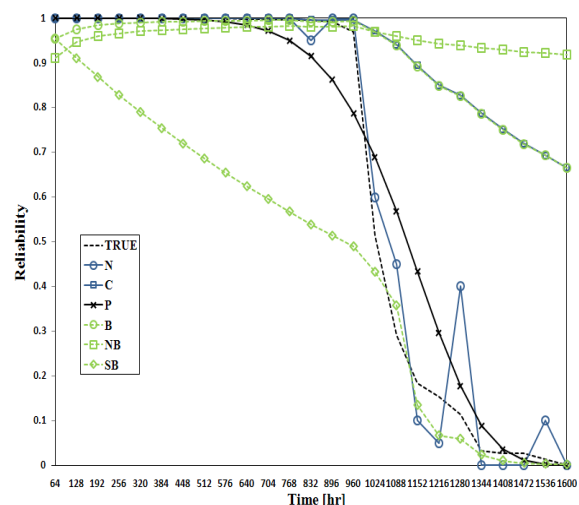


Figure 5. Reliability estimation results for quantal-response data (sample size = 20)

정된 신뢰도 값과 동일하다. 6가지 신뢰도 추정방법을 이용하여 추정된 신뢰도를 <Figure 6>에 나타내었다.

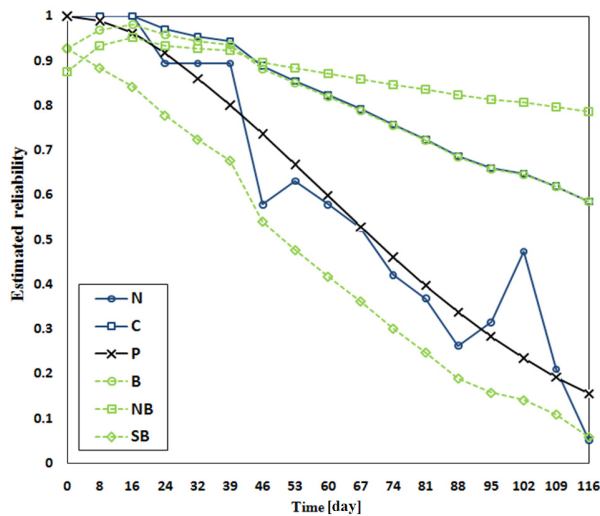


Figure 6. Reliability Estimation results for a weapon system

SB는 다른 방법들에 비해 대부분 시점에서 가장 낮은 신뢰도를 추정하였으며, NB와 B, C는 대부분 시점에서 참값 보다 크게 신뢰도를 추정하였고, B와 C는 유사한 신뢰도를 추정하였다. 따라서 참값 신뢰도는 NB와 B, C에 의해 추정된 신뢰도 보다는 작고, SB에 의해 추정된 신뢰도 보다는 큰 값을 가지는 범위에 존재한다고 예상할 수 있다. <Figure 6>으로부터 P가 참값 신뢰도에 근접하게 신뢰도를 추정한다고 평가할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 탄약, 미사일, 우주발사체, 소화기, 화생방 물자, 의약품, 에어백과 같은 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추정하는 방법들에 대한 정확성을 비교하고, 추정경향성을 도출하였다. 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 모사하고 추정해야하는 참값 신뢰도를 평가하기 위하여 LED에 대한 가속수명시험을 실시하였다. 모사한 가부반응 데이터를 이용하여 문헌에 공개된 원샷 시스템의 6가지 신뢰도 추정 방법들에 대한 정확성을 SSE와 MSE를 이용하여 비교하였으며, MSE를 이용하여 추정 경향성을 도출하였다. 또한 도출한 경향성을 모사한 가부반응 데이터와 실제 원샷 시스템의 가부반응 데이터에 적용하였다.

LED에 대한 가부반응 데이터를 이용하여 신뢰도를 추정한 결과, 비모수 누적법, 베타분포를 사전분포로 하는 베이저안법, 정규분포를 사전분포로 하는 베이저안법에 의한 신뢰도

추정은 시점이 증가함에 따라 참값 신뢰도를 과대추정하는 경향을 나타내었으며, 결측 균일분포를 사전분포로 하는 베이저안법은 과소추정하는 경향을 나타내었다. 그러나 비모수 비누적법과 모수 추정법은 일정한 경향성을 나타내지 않았다. 정규분포를 사전분포로 하는 베이저안법은 신뢰도 변화율이 매우 미소한 경우에는 다른 방법들에 비해 정확성이 높지만, 신뢰도 변화가 큰 경우에는 정확성이 가장 낮았다. 신뢰도 변화가 매우 큰 경우 결측 균일분포를 사전분포로 하는 베이저안법의 정확성이 비모수 비누적법을 제외한 다른 방법에 비해 높다고 평가할 수 있다. 비모수 비누적법에 의한 방법은 표준편차가 다른 방법에 비해 가장 크기 때문에 실제 가부반응 데이터에 적용하는 경우, 큰 오차를 유발할 수 있는 단점이 있다. 따라서 추정할 참값 신뢰도가 급격히 변화하는 경우에는 결측 균일분포를 사전분포로 하는 베이저안법이 다른 방법에 비해 정확성이 높고, 다른 경우에는 모수 추정법에 의한 신뢰도 추정이 다른 방법에 비해 정확성이 높다고 평가할 수 있다.

베이저안법은 사전분포가 신뢰도 추정결과에 중대한 영향을 미치기 때문에 본 연구에서 고려한 사전분포의 모수값들의 변화에 따른 정확성 비교를 향후 연구에서 수행할 예정이다. 또한 모수 추정법과 결측 균일분포를 사전분포로 하는 베이저안법을 통합한 신뢰도 추정방법에 관한 연구를 수행할 예정이다.

#### 참고문헌

- Back, S.-J., Chang, I.-H., Park, B.-C., Jung, E.-J., and Son, Y. K. (2009), Storage lifetime improvement of K1 Delay systems through implementing double-base delay columns, *Proc. Conf. on The Korean Institute of Military Science and Technology conference*, Korea.
- Guikema, S. D. (2005), A comparison of reliability estimation methods for binary systems, *Reliability Engineering and System safety*, **87**, 365-376.
- Guikema, S. D. and Pate-Cornell, M. E. (2004), Bayesian analysis of launch vehicle success rates, *Journal of Spacecraft and Rockets*, **41**(1), 93-102.
- Hamada, M. S., Wilson, A. G., Reese, C. S., and Martz, H. F. (2008), *Bayesian Reliability*, Springer, New York.
- Nelson, W. B. (1892), *Applied Life Data Analysis*, Wiley and Sons, Hoboken.
- Son, Y. K., Back, S.-J., and Ryu, J.-H. (2009), Comparison of reliability estimation methods for one-shot binary systems, *Proc. 17th Conf. on Grounded Weapons system*, Korea.
- Steven, C. C. and Canale, R. P. (2008), *Numerical Methods for Engineers*, McGraw Hill, New York.
- Van den Bos, Adriann (2007), *Parameter estimation for scientists and engineers*, Wiley, Hoboken.
- Zheng, B., Cai, F., and Xu, J. (2004), Evaluation of system storage reliability, *International Journal of Systems and Cybernetics*, **33**(2), 438-445.