

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2023.27.3.033>

베이지안 방법론 기반 발사체용 파이로장치 신뢰도 입증

김동성^a · 장승교^{a,*}

Reliability Verification of Pyrotechnic Devices for Launch Vehicles Based on Bayesian Method

Dong-seong Kim^a · Seung-gyo Jang^{a,*}^a1st Institute, Agency for Defense Development, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: jsg4580@add.re.kr

ABSTRACT

Pyrotechnic Devices used in the aerospace industry are required to be highly reliable as one-shot devices, and in particular when applied to space launch vehicles, they are required to have enhanced reliability according to relevant standards. The required reliability assuming that the operating characteristics of the pyrotechnic device follow a binomial distribution can be verified by not failing even once in a test using more than about 600 samples. For this reason, when conducting tests that include extreme environments, Bayesian methodology, which is costly and time-consuming for reducing the number of samples to prove required reliability except when developing a completely new pyrotechnic device, is in the spotlight. In this study, a reliability verification method applying the Bayesian methodology to electric initiators, which are commonly used in most pyrotechnic devices, is presented and reliability is estimated based on initiator operation tests of a relatively small samples.

초 록

항공 우주 산업에 사용되는 파이로 장치는 원샷 디바이스로서 높은 신뢰도가 요구되는데, 특히 우주 발사체에 적용할 경우에는 관련 규격에 따라 한층 보강된 신뢰도가 요구된다. 파이로 장치의 동작 특성이 이항분포를 따른다고 가정할 때 약 600개 이상의 시료를 이용한 시험에서 단 한 번의 실패도 발생하지 않아야 요구된 신뢰도를 입증할 수 있다. 이를 위하여 극한 환경까지 포함하는 시험 시, 높은 비용과 시간이 필요하기에 온전히 새로운 파이로 장치를 개발할 때를 제외하고는 시료의 수를 대폭 감소시킬 수 있는 베이지안 방법론을 이용하여 요구되는 신뢰도를 입증하는 기법이 주목 받고 있다. 본 연구에서는 파이로 장치에 공통적으로 적용되는 전기식 착화기에 대하여 베이지안 방법론을 적용한 신뢰도를 입증하는 방법을 제시하였고, 비교적 적은 시료 수의 착화기 작동 시험 결과를 바탕으로 신뢰도를 추정하였다.

Key Words: Pyrotechnic Device(파이로 장치), Reliability(신뢰도), Bayesian Method(베이지안 기법)

Received 1 December 2022 / Revised 23 May 2023 / Accepted 30 May 2023

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2022년도 추계학술대회(2022.11.23.~25,

파라다이스호텔 부산) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

발사체의 점화, 분리 및 구속 등의 메커니즘을 만들어내는 장치인 파이로 장치(Pyrotechnic Device)는 화약을 이용하고 1회 사용으로 그 기능이 완료되기 때문에 보통 일회성 장치라는 의미에서 원샷 디바이스 (One-shot Device)라고 부르며, 사전점검 및 재사용이 불가능하여 설계/제작 시 높은 신뢰도가 요구되고 있다. 파이로 장치와 관련된 규격에서는 95% 신뢰수준 (Confidence Level)에서 신뢰도 0.995 이상의 신뢰도(Reliability)를 요구 조건으로 제시하고 있고, 특히 우주 발사체 등에 사용되는 파이로 장치는 더 높은 수준의 신뢰도를 요구하기도 한다. 이는 이항분포를 고려했을 때 598개의 파이로 장치를 시험하여 한 번의 실패도 발생하지 않아야 도달할 수 있는 신뢰도이다[1].

주로 파이로 장치의 에너지원으로 사용되는 전기식 착화기는 기구적 메커니즘을 동작시키고 점화장치를 연소시키며, 민감한 고폭약을 기폭시키기 위하여 짧은 순간에 고온/고압의 가스를 발생시킨다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 발열선(Hot Bridge Wire)에 전류가 공급되면 수 milli-second 이내에 1차 화약(Primary Charge)이 연소되고, 이어서 2차 화약(Secondary Charge)이 순차적으로 연소 됨으로써 연소 가스를 발생시킨다.

전기식 착화기는 화약의 조성, 발열선의 재질과 하우징의 형상 등에 따라 새로운 모델로 구분되는데, 일반적으로 새로운 모델에 대해서는 MIL-DTL-23659F의 규격을 적용하여 최소 416발

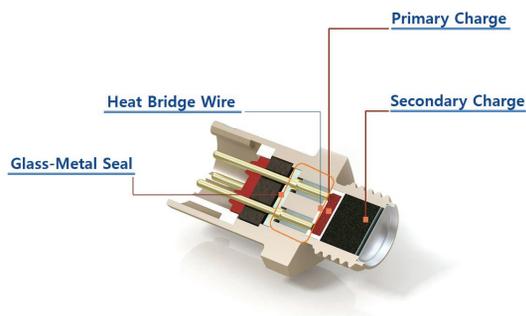


Fig. 1 Configuration of initiator[4].

의 시험을 해야 하고 약 180발의 성능시험을 수행하여 요구되는 신뢰도를 충족시킬 수 있다. 그러나 적용 시스템 요구에 따라 착화기 설계상 경미한 설계 변경이 있거나 새로운 로트를 구성하여 신뢰도를 제시할 때는 기존 착화기의 신뢰도를 바탕으로 적은 시료 수를 이용한 시험 결과만으로도 요구되는 높은 신뢰도를 입증/추정할 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 개발한 전기식 착화기에 대하여 이처럼 효율적인 방법으로 신뢰도를 계산하는 기법을 제시한다. 신뢰도 입증을 위하여 총 99발의 착화기를 이용하였고 10-cc 밀폐용기 시험(closed bomb test, CBT)을 이용하여 착화기의 정상 동작 여부를 확인하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 착화기와 같은 일회성 품목의 경우 성능의 특성이 성공/실패(Pass/Fail)로 나타나기에 신뢰도를 추정할 때 이항분포(Binomial Distribution)를 가정하여 신뢰도를 산출한다. 이항분포에서 n 개의 시료 중 m 개의 고장이 발생하였을 때 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)는 Eq. 1과 같이 정의할 수 있다[2,3].

$$f(m) = {}_n C_m (1-R)^m R^{n-m} \quad (1)$$

Eq. 1에서 n 은 총 시료 수, m 은 고장 수, R 은 신뢰도(R 은 0~1 사이의 값)를 나타낸다. 이항분포의 누적밀도함수(Cumulative Density Function, CDF)가 유의수준 α 와 같을 때, 시료 수 n 은 Eq. 2와 같이 산출한다.

$$\alpha = \sum_{i=0}^r {}_n C_i (1-R)^i R^{n-i} \quad (2)$$

Eq. 2에서 고장 수 $r=0$ 인 경우, $\alpha=R^n$ 과 같이 정리할 수 있으며, 95% 신뢰수준에서 목표한 신뢰도 R 을 보증할 수 있는 시료 수는 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. The number of test (Binomial Dist., $\alpha=0.05$).

| Reliability | Number of failure | Number of test |
|-------------|-------------------|----------------|
| 0.90 | 0 | 29 |
| 0.95 | 0 | 59 |
| 0.99 | 0 | 299 |
| 0.995 | 0 | 598 |
| 0.999 | 0 | 2995 |

이 경우 0.995의 신뢰도를 만족하는 시료 수 n 은 598개로 매우 많은 수량이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 이항분포를 적용하였을 때 발생할 수 있는 비용 및 시간적인 문제를 보완하기 위해 베이지안 접근법을 적용하였다[5,6].

베이지안 접근법에서 착화기의 신뢰도 R 은 이항분포의 특성을 가지기 때문에 우도(Likelihood)를 이항분포로 가정하며, 사전분포인 신뢰도가 0~1의 값을 가지기 때문에 Eq. 3과 같은 베타 사전분포(Beta Prior Distribution)를 가정한다[7].

$$f(R) = \frac{\Gamma(\alpha_0)\Gamma(\beta_0)}{\Gamma(\alpha_0 + \beta_0)} R^{\alpha_0 - 1} (1 - R)^{\beta_0 - 1} \quad (3)$$

Eq. 3에서 α_0 , β_0 는 베타분포 모수, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수, R 은 신뢰도를 나타낸다. 베타분포의 모수는 Eq. 4 및 Eq. 5와 같이 기댓값과 분산 값의 조합으로 표현할 수 있다.

$$\alpha_0 = E(R) \left[\frac{E(R) - E^2(R)}{Var(R)} - 1 \right] \quad (4)$$

$$\beta_0 = (1 - E(R)) \left[\frac{E(R) - E^2(R)}{Var(R)} - 1 \right] \quad (5)$$

이 경우에 기댓값과 분산은 사전정보에 따라 구하는 방법을 달리하여야 한다. 만약 시스템 전체의 신뢰도에 대한 정보를 아는 경우 기댓값과 분산은 Eq. 6 및 Eq. 7과 같이 구할 수 있다.

$$E(R) = \frac{a + 4b + c}{6} \quad (6)$$

$$Var(R) = \left(\frac{c - a}{6} \right)^2 \quad (7)$$

여기에서 a , b , c 는 각각 신뢰구간의 하한값, 신뢰도 평균값, 신뢰구간의 상한값을 나타낸다. 만약 전체 시스템이 아닌 부 시스템(Subsystem) 단위의 신뢰도에 대한 정보를 아는 경우 각 부 시스템의 기댓값 및 분산 값은 Eq. 8 및 Eq. 9와 같이 계산한다[8].

$$E(R_i) = \frac{n_i - r_i}{n_i + 1} \quad (8)$$

$$Var(R_i) = \frac{(n_i - r_i)(r_i + 1)}{(n_i + 1)^2(n_i + 2)} \quad (9)$$

여기에서 n_i 는 전체 시료 수, r_i 는 고장 수(허용 또는 시험에 따른 고장 수)를 나타내며, k 개의 부 시스템이 존재하는 직렬 시스템의 기댓값 및 분산 값은 각각 Eq. 10 및 Eq. 11과 같다.

$$E(R) = \prod_{i=1}^k [E(R_i)] \quad (10)$$

$$Var(R) = \prod_{i=1}^k [E^2(R_i) + Var(R_i)] - \prod_{i=1}^k [E^2(R_i)] \quad (11)$$

반면에 부 시스템 간의 연결이 병렬로 연결되어 있는 경우 기댓값과 분산 값은 각각 Eq. 12 및 Eq. 13과 같이 계산할 수 있다.

$$E(R) = 1 - \prod_{i=1}^k [E(R_i)] \quad (12)$$

$$Var(R) = [1 - E(R)] \left[\prod_{i=1}^k \frac{2}{n_i + 2} - \{1 - E(R)\} \right] \quad (13)$$

위와 같은 식에서 필요한 신뢰도의 정보는 성능 모델을 통해 산출된 신뢰도의 평균 및 분산을 적용하여 α_0, β_0 를 산출한다. 이후 베イズ 이론에 따라 이항분포에 베타 사전분포의 확률밀도함수를 곱하면 베타 사후분포(Beta Posterior Distribution)가 유도되며, 아래와 같은 신뢰성 입증 시험계획을 수립할 수 있다.

베타 사후분포의 누적밀도함수가 유의수준과 같을 때의 시료 수를 n 이라고 한다면, 사전정보에 따른 시료 수 n 은 Eq. 14를 통해서 산출할 수 있으며, Table 2와 같이 사전정보에 따른 시료 수 n 을 도출할 수 있다. Table 2의 $E(R)$ 는 착화기가 가지고 있는 사전정보에서 산출된 신뢰도의 평균값을, $Var(R)$ 는 사전정보에서 산출된 신뢰도의 분산 값을 나타낸다. 베이지안 통계를 통해 계산된 필요 시험 수량을 앞선 이항분포에서의 시료 수(0.995 신뢰도(@95%) 보증 시 598개의 시료 수 필요)와 비교하면, 적은 수의 시료를 통해 더 높은 신뢰도를 보증할 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$\alpha = \int_0^R x^{n-r+\alpha_0-1} (1-x)^{r+\beta_0-1} dx \quad (14)$$

3. 신뢰도 입증 시험

2장에서 소개한 이론적 배경을 바탕으로 실제 착화기의 신뢰도 입증을 위한 시험을 설계하고

Table 2. The number of test(Bayesian Method).

| $E(R)$ | $Var(R)$ | | | | |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | $1.2e^{-07}$ | $1.4e^{-07}$ | $1.6e^{-07}$ | $1.8e^{-07}$ | $2.0e^{-07}$ |
| 0.99950 | 712 | 821 | 890 | 935 | 964 |
| 0.99953 | 567 | 685 | 761 | 812 | 845 |
| 0.99957 | 395 | 521 | 604 | 660 | 698 |
| 0.99960 | 281 | 410 | 496 | 555 | 596 |
| 0.99963 | 180 | 310 | 398 | 457 | 499 |
| 0.99967 | 65 | 192 | 278 | 338 | 379 |
| 0.99970 | 10 | 114 | 197 | 255 | 295 |

시험 결과에 따른 신뢰도 입증을 실시하였다.

신뢰도 시험을 설계하기 위해 착화기의 신뢰도에 대해 정의하기 위해 착화기의 고장 메커니즘을 분석하였다. 착화기의 고장 메커니즘은 크게 정전기 등에 의한 우발 점화, 화약의 작동 이상으로 인한 착화 실패나 압력 규격미달, 내구성 저하로 인한 구조 파괴 및 압력 누출의 3가지로 정의할 수 있다. 이 중 화약의 작동 이상을 제외한 나머지 2가지 고장의 경우 성능 모델의 구축이나 고장 현상의 모사가 어려운 점이 있어 본 연구에서는 화약의 작동에 대해서만 고려하였다. 따라서, 본 연구에서 정의한 고장은 화약이 요구된 성능을 발휘하지 못하는 경우를 말하며, 신뢰도는 화약이 제대로 작동하여 요구된 성능을 발휘할 확률로 정의한다.

앞선 정의 및 Fig. 1에 따라 착화기의 성능 모델은 발열선 모델과 화약 작동에 따른 압력형성 모델 2가지로 구축하였다. 구축된 성능 모델을 바탕으로 Fig. 2와 같은 베이지안 네트워크를 구축하여 각 모델에서의 신뢰도를 계산 후 전체 신뢰도를 산출하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 착화기의 사전정보는 Table 3과 같이 신뢰도의 평균값은 0.9999, 분산 값은 $4.9109e-08$ 이며, 이는 구축한 성능 모델을 바탕으로 예측한 신뢰도를 나타낸 것이다[9,10].

사전정보를 바탕으로 신뢰도 입증을 위한 시료 수를 산출하면 Table 3과 같이 99개로 산출

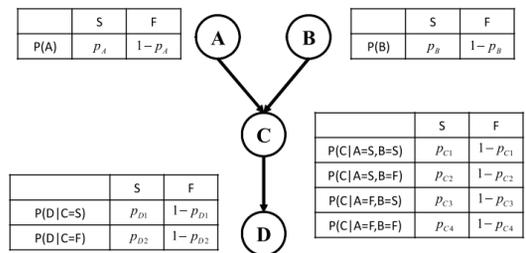


Fig. 2 Example of bayesian method[9].

Table 3. The number of test about initiator.

| | Mean | Variance | Number |
|-------|--------|--------------|--------|
| Value | 0.9999 | $4.9109e-08$ | 99 |

되었으며, 이는 신뢰수준 95%일 때 신뢰도 0.999를 만족하기 위한 시험 시료 수를 나타낸 것이다. 여기서 허용 고장 수는 1개로 99개를 성능 시험할 때 98개 이상 요구 규격을 만족한다면 신뢰도 0.999를 입증하는 것이라고 할 수 있다. (수량에 따른 신뢰도 Table 4 참조(실패 1회))

시험에 필요한 수량을 결정한 후 Fig. 2와 같이 구성된 성능 시험장치를 활용하여 착화기의 화학 성능과 연관된 성능 지표를 측정하였다. 시험 장비는 전류를 인가하는 전원 인가 장치(Current Pulser)와 착화기가 동작하여 연소가스에 의해 압력이 형성되는 10-cc 밀폐용기(closed bomb), 압력을 측정하는 신호처리기(ICP sensor signal conditioner)와 발생한 압력 파형을 기록하는 오실로스코프(oscilloscope)로 구성된다. 계측 신뢰도를 높이기 위하여 2개의 압력센서를 설치하였다.

전원 인가장치를 통해 착화기에 전류를 공급하면 착화기는 매우 짧은 시간에 착화되고 밀폐용기내에 연소가스에 의한 압력이 형성되는데 이 때 계측된 압력 곡선은 Fig. 3과 같다. 성능 시험을 통해 산출되는 성능 지표는 점화 지연시간(Ignition Delay Time, t_d , 점화 전류가 인가된 이후 100 psi 이상으로 유지되는 초기 시간), 최대압력 도달시간(maximum pressure peak time, t_{max} , 압력이 상승하기 시작한 시점부터 최대압력이 계측된 시점까지의 시간), 최대압력(maximum pressure, P_{max})의 3가지이다. 이 중 점화 지연시간 및 최대압력 도달시간은 착화기의 감도(sensitivity), 최대압력은 착화기의 위력(Power)을 나타내는 성능 변수라고 할 수 있다. 각각의 변수는 압력 센서를 통해 계측된 자료를 바탕으로 Fig. 4와 같이 정의한다.

Table 4. Reliability verification by quantity of test.

| | Number | Reliability Verification |
|-----------|-----------|--------------------------|
| Initiator | 96 | 0.9989992 |
| | 97 | 0.9989995 |
| | 98 | 0.9989998 |
| | 99 | 0.9990001 |

본 연구에서는 성능시험에서 측정할 수 있는 3가지 변수 중 규격에서 사용되는 최대압력 도달시간과 최대압력 측정 결과를 활용하여 신뢰도 입증 결과를 확인하고자 하였다. 시험 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 가로축은 최대압력 도달시간(규격

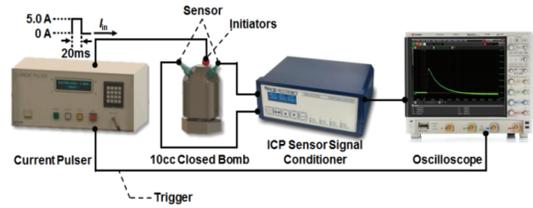


Fig. 3 Performance test devices[10].

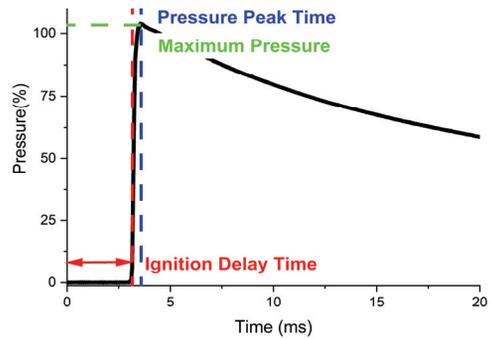


Fig. 4 Test result plot.

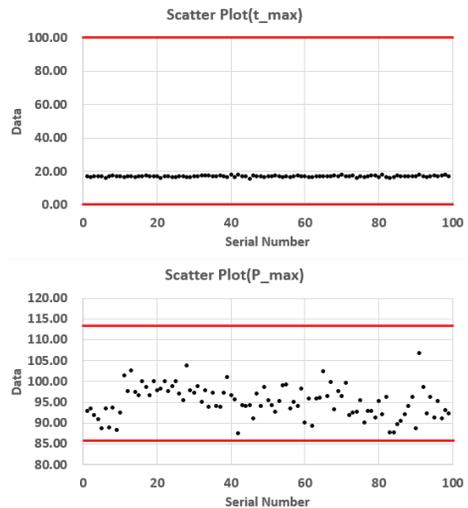


Fig. 5 Performance test result.

대비 비율로 표기, 100% 이하인 경우 규격 만족), 세로축은 최대압력(규격 대비 비율로 표기, 85.7% 이상 114.3% 이하인 경우 규격 만족)을 나타낸다. Fig. 4와 같이 99개 시료 중 99개 시료 모두 규격 범위를 만족하는 것을 확인할 수 있었으며, 목표한 신뢰도 0.999(@95% 신뢰구간)를 입증할 수 있는 시험 수량을 달성한 것을 확인하였다[11].

성능시험 결과 최대압력 도달시간은 약 16~18%로 나타났는데 이는 일반적인 규격 범위를 만족하는 값으로 우수한 산포를 나타내고 있다. 반면, 최대압력 값의 경우는 시험 결과가 모두 규격을 만족하지만 비교적 넓은 산포를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 전기식 착화기의 동작 특성상 대부분의 착화기에서 발생하는 산포로서 성능에 특별한 영향을 미치는 요소는 아니다. 결론적으로 성능 지표들의 산포가 매우 안정적인 것을 확인하였다.

4. 결 론

발사체에 적용되는 착화기와 같은 원샷 디바이스는 높은 신뢰도가 요구된다. 실제 시험을 통하여 요구되는 신뢰도를 달성하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구되지만, 성능 모델을 활용한 시뮬레이션을 활용하면 시료 없이도 신뢰도를 산출할 수 있다. 그러나 이 경우 모델에 대한 불확실성과 시뮬레이션에 대한 신뢰성에 의구심을 제기할 수 있다. 이에 본 연구에서는 베이지안 기법을 적용하여 착화기의 설계 및 제작에 관련된 신뢰도를 입증하는 방법에 대해 논하였다. 이를 위해 먼저 사전정보와 우도 함수의 분포를 설정한 후 이를 베이지안 이론에 대입하여 신뢰도의 평균, 분산 및 신뢰수준에 따라 시료 수를 산출하는 방안을 제안하였다. 연구의 대상인 착화기의 성능 및 작동 메커니즘의 특성을 반영하여 사전정보는 이항분포로, 사후분포는 베타분포로 정의하였으며, 이를 베이지안 기법을 통해 베타 사후분포로 정의하여 시험계획을 수립하였다. 시험은 95% 신뢰구간에서 0.999 신뢰

도를 입증할 수 있도록 계획되었으며, 99개의 시료 중 98개가 만족하는 경우 목표한 신뢰도를 입증할 수 있다고 판단하였다.

수립한 계획을 바탕으로 10-cc 밀폐용기 시험을 실시, 예측된 압력 곡선을 이용하여 착화기의 성능 변수를 분석하였으며, 이를 규격에 정의된 사항과 비교하여 고장 발생 여부를 판단하였다. 시험 결과 99개의 시료 중 99개의 시료 모두 정상 동작하여 요구 신뢰도 0.999를 만족하였다.

References

1. Bement, L.J. and Multhaup, H.A., "Determining functional reliability of pyrotechnic mechanical devices," *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 3, pp. 357-363, 1999.
2. Haldar, A. and Mahadevan, S., *Probability, reliability and statistical methods in engineering design*, John Wiley & Sons., Inc., New York, U.S.A., 2000.
3. Rice, J.A., *Mathematical statistics and data analysis 2nd*, Cengage Learning, Boston, U.S.A, 2010.
4. Cha, S., Woo, J., Kim, Y., Oh, S., Cho, J., Kim, J.H., Jang, S., Yang, H.W. and Roh, T., "Combustion Modeling of Explosive for Pyrotechnic Initiator," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 6, pp. 39-48, 2017.
5. Bae, S., Kim, N.H., Park, C. and Kim, Z., "Confidence Interval of Bayesian Network and Global Sensitivity Analysis," *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 11, pp. 3916-3924, 2017.
6. Dezfuli, H., Kelly, D., Smith, C., Vedros, K. and Galyeanm W., "Bayesian Inference for NASA Probabilistic Risk and Reliability Analysis," NASA, 2009.
7. Adamantios Mettas, Huairui Guo and Tongdan Jin, "Designing Reliability Demonstration Test for One-shot System under Zero Component Failures," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 60, No. 1,

- pp. 286-294, 2011.
8. Benedict, A.G., "Reliability-Confidence Combination for Small Sample Tests of Aerospace Ordnance items," NASA Technical Report 32-1165, 1967.
 9. Bae, S., Kim, N., Park, C. and Kim, Z., "Confidence Interval of Bayesian Network and Global Sensitivity Analysis," *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 11, pp. 3916-3924, 2017.
 10. Han, D., Sung, H., Jang, S. and Ryu B., "Parametric Analysis and Design Optimization of a Pyrotechnically Actuated Device," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 17, No. 3, pp. 409-422, 2019.
 11. Logan, R.W. and Nittam C.K., "Verification & Validation (V&V) methodology and quantitative reliability at confidence(QRC) : basis for an investment strategy," Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-150874, 2002.