

## 발사체 신뢰도 분석

한풍규\* · 김경호\* · 우유철\* · 조상연\*\* · 김용욱\*\*

### Launch Vehicle Reliability Analysis

Poonggyoo Han · Kyoungho Kim · Yoocheol Woo · Sangyeon Cho · Yongwook Kim

#### 초 록

주요 우주 발사체 보유 국가에서 1957년부터 1999년 사이에 발사된 우주 발사체의 성공 및 실패 이력에 대해 베イズ 분석기법을 적용하여 각국의 발사체에 대한 신뢰도를 분석하였다. 베イズ 분석기법에서 사전분포함수로는 베타함수를 사용하였으며, 미래의 발사체 성공률을 표현하는 사후분포함수는 년도별 누적된 발사 이력을 반영한 베타 사전함수를 이용하여 년도마다 발사체 신뢰도를 평가하는 경우와 첫 발사부터 1999년까지의 발사 성공률에 대한 평균과 분산을 반영한 베타 사전함수를 이용하여 년도별 발사체 신뢰도를 구하는 경우로 나누어 구하였다. 발사 이력이 많은 국가의 경우에는 베イズ 분석기법으로 구한 성공률과 산술적으로 구한 성공률은 거의 동일하였으나, 발사 이력이 적은 국가에서는 비교적 큰 차이를 나타내었다. 따라서 발사 이력이 적은 경우에는 산술적 평균에 의한 성공률보다는 베イズ 기법을 이용한 향후 발사체의 발사 성공률 분석이 우주 발사체의 신뢰도를 평가하는데 적합하다는 것을 알 수 있었다.

#### 1. 서 론

우주 발사체의 신뢰도는 부여받은 작동 시간과 조건 하에서 정상적인 작동을 하는 경우에 대한 통계적인 확률을 의미하며, 우주 발사체의 신뢰도를 평가하기 위해서는 설계 단계에서 설정된 고유 신뢰도, 구조 및 성능에 대한 신뢰도, 발사 이력에 의한 관측 신뢰도 등을 파악하여야 한다.

우주 발사체의 신뢰도에 대한 기존 연구동향으로는, 발사체를 구성하는 엔진 및 추진계통 등 서브 시스템과 설계, 제작 및 시험으로 분류될 수 있는 개발 네트워크에 대한 통계적 위험 분석을 거쳐, 우주 발사체 전체 시스템에 대한 성공 또는 실패 확률을 구함으로써, 발사체에 대한 신뢰도를 평가하는 것이었다<sup>[1][2]</sup>. 또한 우주 발사체의 실패 사례에 대한 연구<sup>[3]</sup>와 발사 이력에 대한 산술적 통계에 의한 신뢰도 분석이 이루어져 왔으며<sup>[4]</sup>, 최근에는 베イズ 분석 기법을 이용하여 발사체의 발사 이력을 통해 통계적

으로 발사체 성공률을 예측하는 연구가 수행되었다<sup>[5]</sup>.

본 연구에서는 발사 이력에 의한 관측 신뢰도로 분류할 수 있는, 발사체 전체 시스템의 발사 성공 및 실패 이력에 대한 베イズ 분석 기법에 의한 통계적 분석을 통해 우주 발사체의 신뢰도를 평가하기로 한다. 신뢰도를 분석하기 위한 통계 처리는 MATLAB Ver. 6.1에서 제공하는 내장함수를 사용하였으며, 국가별 발사체 발사 성공률을 분석함과 동시에, 우주 발사체를 보유한 국가에 대한 기술력 수준을 평가하기로 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 베イズ 분석 기법

베イズ 분석기법에 의하면, 미래의 발사체 성공률을 표현하는 사후분포함수는 사전 신뢰 정도를 나타내는 사전분포함수와 관측된 발사 이력 자료로부터 구할 수 있는 가능도 함수의 곱

\* 현대모비스 기술연구소

\*\* 한국항공우주연구원

에 비례하며, 식(1)과 같이 표현할 수 있다<sup>[6]</sup>. 식 (1)의 분모에 있는 적분식은 사후분포함수의 적분을 1로 만들어주는 인자이다.

$$f_{A/D}(a|s, t) = \frac{f_{D/A}(s, t|a)f_A(a)}{\int_x f_{D/A}(s, t|x)f_A(x) dx} \quad (1)$$

여기서, A는 발사체의 향후 평균 발사 성공률을 의미하며, s와 t는 각각 과거의 발사 성공횟수와 발사 횟수이다. A는 불확정 변수이므로, 확률밀도함수인  $f_A(a)$ 를 사전분포함수로 나타낼 수 있다. 가능도 함수인  $f_{D/A}(s, t|a)$ 는 미래의 발사 성공률이 a인 경우에 발사횟수 t에서 성공횟수가 s인 확률을 의미한다.

식(1)의 좌변은 사후분포함수로서, Howard<sup>[7]</sup>는 어떠한 사건의 향후 발생시 성공 확률의 최적 예상치는 사후확률밀도함수의 평균임을 증명한 바 있으므로, 식 (1)에서 구한 사후분포함수에 대해 1차 모멘트를 취하여 사후분포함수의 평균을 구할 수 있다면, 향후 발사체의 발사 성공률을 예측할 수 있게 된다.

식(1)에 사용된 사전분포함수는 베타함수로 표현될 수 있으며, 향후 발사체 성공에 대한 사전 확신을 나타낸다. 베타함수의 두 인자에 따라서 여러 가지 형태의 사전분포함수를 구할 수 있으나, 본 연구에서는 Beta(1,1)로서, 최초의 사전확신은 전 구간에 걸쳐 0.5라고 가정하였다.

식(1)의 a에 대한 베타 사후확률밀도는 s와 t에 대해 식(2)로 표현될 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$f_A(a|s, t) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(s)\Gamma(t-s)} a^{s-1} (1-a)^{t-s-1} \quad (2)$$

또한, 향후 t 회의 발사에서 s' 회의 성공을 나타내는, 최신화 과정을 거친 사후분포함수는 식(3)과 같이 변형될 수 있다.

$$f_{A/D}(a|s', t) = \frac{\Gamma(t+t')}{\Gamma(s+s')\Gamma(t+t'-s-s')} * a^{s+s'-1} (1-a)^{t+t'-s-s'-1} \quad (3)$$

식(2)과 (3)에서 사용된  $\Gamma$ 는 감마함수이다.

## 2.2 베이스 분석기법에 의한 우주 발사체 신뢰도 평가

국가별 발사체 발사이력<sup>[5]</sup>은 발사체 종류와는 무관하게, 1957년부터 1999년까지 년도별 발사

횟수와 성공 횟수로 표현되어 있으며, 표1에 수록하였다.

베이스 분석기법은 년도별 발사 이력을 반영하는 사전분포함수를 이용하여 년도마다 발사체 신뢰도를 평가하는 경우(1차 사후분포함수의 평균)와 첫 발사 년도부터 1999년까지 년도별로 누적된 발사 이력에서 구한 성공률과 그 분산을 반영한 베타 사전함수를 이용하여 년도별 발사체 신뢰도의 변화를 구하는 경우(2차 사후분포함수의 평균)에 대해 적용하였다.

### 2.2.1 국가별 발사체 신뢰도 평가

발사 이력이 많은 러시아, 미국의 경우, 그림1과 같이 1950년대 말부터 1960년 초에 걸친 초기 단계에서의 발사체 신뢰도는 0.3-0.7의 낮은 수준에 있었다. 이는 발사체 개발 기술이 안정화 단계에 이르지 못한 상태에서 발사 성공률이 낮았다는 것을 의미하며, 현재에 이르러서는 발사체의 신뢰도는 각각 0.93과 0.89으로 매우 높은 수준에 이르고 있다. 단순한 수치 비교로 보면, 러시아의 발사체가 미국의 발사체보다 신뢰도가 높다는 것을 알 수 있으나, 이것은 발사체의 종류와는 무관하게 단순히 발사체의 발사 이력을 집계한 데이터에 기인한 것으로, 주요 발사체에 대한 개별적인 신뢰도는 상기의 수치와는 다른 값을 가질 수 있다.

한편, 그림1과 표1에서 보면, 사 이력이 증가함에 따라 산술적 발사 성공률과 베이스 기법에 의한 통계적 발사 성공률이 거의 동일한 수준을 유지하고 있다. 그러나 발사 이력이 적은 초기 단계나 발사 이력이 적은 국가의 경우에는, 산술적 발사 성공률과 통계적 발사 성공률은 비교적 큰 차이를 보이고 있으며, 특히 발사 이력이 1회에 불과한 한국(KSR-3, 2002, 성공)과 북한(대포동, 1998, 실패)의 경우에는, 산술적 발사 성공률이 각각 1과 0이지만, 통계적 발사 성공률을 각각 0.67과 0.33으로 큰 차이를 보이고 있다.

따라서 개발 초기 단계에서 발사이력이 적은 경우, 발사 성공률은 산술적인 평균에 의한 극단적인 판단보다는 통계적 발사 성공률을 고려하는 것이 타당하며, 이러한 접근은 발사이력이 늘어남에 따라 통계적인 수치가 산술적인 확률값에 접근한다는 사실에 근거하여, 적절한 판단임을 알 수 있다.

그림1에서 보는 바와 같이, 50회 남짓의 발사 이력을 가지는 중국과 일본의 경우에도 발사 이력이 늘어남에 따라 산술적인 성공률과 통계적 성공률이 근접해 가고 있지만, 미국과 러시아와

는 달리 통계적인 발사 성공률이 산술적 발사 성공률과는 약간의 차이로 적게 나타남을 확인할 수 있다.

### 2.2.2 국가별 발사체 개발 능력 분석 및 평가

첫 발사년도부터 1999년까지의 년도별로 누적된 발사 성공률의 평균과 분산을 반영한 베타 사전분포함수는 각국의 발사체 개발 능력을 표현하는 사전지식이 될 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 향후 발사 성공률을 예측하여, 년도별로 각국의 발사체 성공률을 당시의 개발 수준에 대해서 상대적인 수치로서 나타낼 수 있었다. 그 결과로서, 발사 초기 단계에서 성공률이 높은 러시아와 중국은 산술적 발사 성공률이 통계적 발사 성공률을 나타내는 2차 사후분포함수의 평균값을 상회하는 경우가 발생하였으나, 그 이후의 발사 실패 이력에 의해 산술적 발사 성공률이 통계적 발사 성공률보다 낮게 나타났다. 따라서, KSR-3와 같이 발사 이력이 적은 상태에서 발사 성공을 이루어낸 국가의 발사체 신뢰도는 통계적 발사체 신뢰도를 상회함으로써, 향후의 발사체 성공률을 산술적인 수치로서 판단함에 있어 오류가 있을 수 있음을 보여주고 있다.

또한 미국, 일본과 인도의 경우에는 발사 초기 단계에서는 산술적 또는 1차 사후분포함수의 평균으로 구한 통계적 발사 성공률이 2차 사후분포함수의 평균으로 구한 통계적 발사 성공률보다 낮게 나타나고 있는데, 이것은 발사체 개발 과정에서 개발 기술이 안정화 단계에 이르기 위해서는 일정 기간의 시간을 요구하고 있음을 반증하고 있다.

2.2.3 발사체 신뢰도 평가에서 베이지 기법의 활용  
일반적으로 임의의 기계요소의 신뢰도는 일정 기간 또는 사용횟수 조건에서 경험한 실패 사례에 의해 평가된다. 그러나, 우주 발사체의 경우에는 일반적인 기계요소와는 달리 사용횟수가 적다. 따라서, 강도와 기밀 등의 비연소 성능시험과 연소시험, PTA 및 SQT 등의 연소 성능시험과 발사 과정에서의 점화횟수 정도로 사용횟수를 산정한다면, 일반적인 기계요소의 신뢰도와 같은 방법으로 우주 발사체의 신뢰도를 평가하는 것은 적절하지 못하다.

따라서, 우주 발사체 개발 과정 중, 설계, 제작, 비연소 및 연소 성능시험에서 축적된 기존 데이터에 베이지 기법에 적용하여 통계적으로 신뢰도 분석하는 것이 우주 발사체에는 더욱 적합할 수 있으며, 향후에는 발사체의 핵심 구성요소중 하나인 액체로켓엔진의 개발 과정에서

축적된 모든 이력에 대해 베이지 분석기법을 적용하여, 액체로켓엔진의 신뢰도를 분석할 예정이다.

### 3. 결론

주요 우주 발사체 보유 국가의 발사체 신뢰도를 베이지 분석기법을 활용하여 분석, 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 우주 발사체 발사 이력이 많은 경우에는 산술적 발사 성공률과 통계적 발사 성공률이 거의 동일하게 나타났다.
- 2) 발사 이력이 적은 초기 단계나 또는 발사 이력 자체가 적은 경우에는 극단적인 수치를 보이는 산술적 발사 성공률보다는 베이지 분석기법으로 구한 신뢰도가 타당하다는 판단된다.
- 3) 베이지 분석기법은 우주 발사체를 구성하는 엔진 및 추진계통 등 서브 시스템은 물론 설계, 제작 및 시험이라는 개발 네트워크에 대해서도 적용 가능하다.

### 참고 문헌

1. Guarro, S., B. Bream, L.K. Rudolph, and R.J. Mulvihill, "The Cassini Mission Risk Assessment Framework and Application Techniques," Reliability Engineering and System Safety, V.49, No.3, 1995.
2. Pate-Cornell M.E., and P.S. Fischbeck, "PRA as a Management Tool: Organizational Factors and Risk-Based Priorities for the Maintenance of the Tiles of the Space Shuttle Orbiter," Reliability Engineering and System Safety, V.40, 1993.
3. I-S, Chang, "Investigation of Space Launch Vehicle Catastrophic Failures," AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, V.33, No.2, 1996.
4. I-S. Chang, "Space Launch Vehicle Reliability," Crosslink, V.2, No.1, 2001.
5. S.D. Guikema and Pate-Cornell, M.E., "Bayesian Analysis of Launch Vehicle Reliability," AIAA 2003-1175, 2003
6. P. Gongdon, Bayesian Statistical Modeling, John Wiley and Sons, 2001.
7. Howard, R.A., "Decision Analysis : Perspectives on Inference, Decision, and Experimentation," Proceedings of the IEEE, V.58, No.5, 1970.

