

파이로밸브의 신뢰도 추정

조현선*

*한국항공우주연구원

e-mail:hsuny@kari.re.kr

Reliability Estimation of Pyrovalves

Hyeon-Seon Jo*

*Korea Aerospace Research Institute

요약

파이로 밸브는 가볍고 신뢰성이 높아 국방 및 우주산업 분야에서 개폐밸브로 널리 사용된다. 파이로밸브의 작동원리는 밸브에 조립된 착화기의 기폭에너지가 니플을 절단하여 유로를 개폐하는 것이다. 착화기의 기폭 여부는 파이로밸브의 신뢰성으로 귀결되며 본 논문에서는 이를 바탕으로 착화기의 신뢰도를 추정하여 최종적으로는 파이로밸브의 신뢰도를 추정하였다. 착화기의 All-fire test 데이터를 기반으로 확률적 모델링을 수행하였고 신뢰도 추정에는 베이지안 기법을 적용하였다.

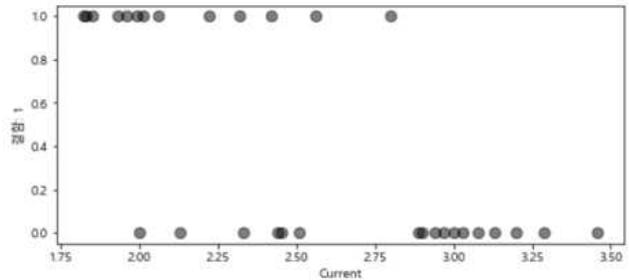
1. 서론

파이로 밸브는 가볍고 신뢰성이 높아 국방 및 우주산업 분야에서 개폐밸브로 널리 사용된다. 파이로밸브의 작동원리는 밸브에 조립된 착화기의 기폭에너지가 니플을 절단하여 유로를 개폐하는 것이다. 착화기의 기폭 여부는 파이로밸브의 신뢰성으로 귀결되며 본 논문에서는 이를 바탕으로 착화기의 신뢰도를 추정하여 최종적으로는 파이로밸브의 신뢰도를 추정하였다. 착화기의 All-fire test 데이터를 기반으로 확률적 모델링을 수행하였고 신뢰도 추정에는 베이지안 기법을 적용하였다. 이때, 파이로밸브와 착화기 조립 부근에서는 누설이 없으며 밸브 끼임과 정렬에는 이상이 없음을 가정하였다. 본 논문은 착화기에 가해지는 전류에 따른 기폭확률을 산출할 수는 방법론을 제안하기 때문에 파이로 밸브를 사용하는 전체 시스템의 위험 관리에 도움이 될 것이라 기대한다. 시험 데이터나 신뢰도 추정 결과는 내부 보안상 일부 미공개 하였다.

2. 파이로 밸브 신뢰도 추정

파이로밸브에 사용되는 착화기의 스펙은 다양하며 본 논문에서 분석 대상이 되는 착화기는 기폭시 약 1000pis의 성능을 가진다. [그림 1]은 착화기 30개 시료의 All-fire test 데이터

를 인가 전류와 기폭여부에 따라 타점한 그래프이다. 특정 인가 전류에서 기폭하였을 경우 0, 미기폭 하였을 경우는 1에 타점하였다. 인가 전류가 높을수록 착화기의 기폭 할 확률이 높아지는 경향을 보이나 인가 전류 2.0~2.8A 사이에는 명확한 경향이나 구분이 미흡하다. 따라서 특정 인가 전류에서 착화기가 기폭하지 않을 확률적 모델링을 통하여 착화기 미기폭 확률을 추정하기로 하였다. 경향이나 구분이 미흡하기 때문에 식을 세워 계산하는 것이 아니라 확률적으로 모델링을 수행하여 모수를 추정하는 것이다.



[그림 1] All-fire test 결과

인가전류에 따른 기폭여부에 대해 표현하기 위해 로지스틱 함수를 선정하였으며 식은 아래와 같다.

$$p(c) = \frac{1}{1 + e^{\beta c + \alpha}}$$

로지스틱함수의 α 와 β 또한 미지수이므로 확률적 모델링이 필요하며 미지수에 대한 특별한 제약이 없으므로 정규 확률함수로 모델링하였다. 두 모수 $\mu = 0, \tau = 0.001$ 인 정규 확률함수로 설정하였다.

$$f(x|\mu, \tau) = \sqrt{\frac{\tau}{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tau}{2}(x - \mu)^2\right)$$

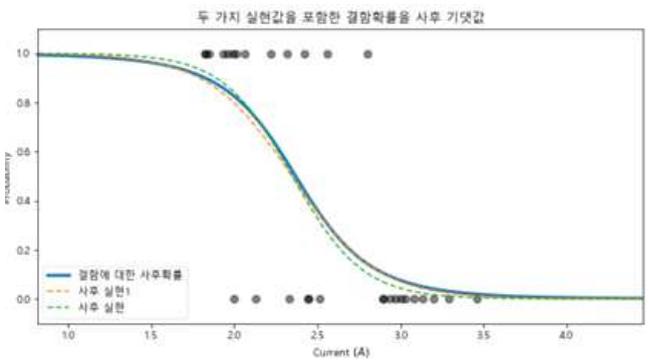
$$\alpha = \text{Normal}(0, 0.001)$$

$$\beta = \text{Normal}(0, 0.001)$$

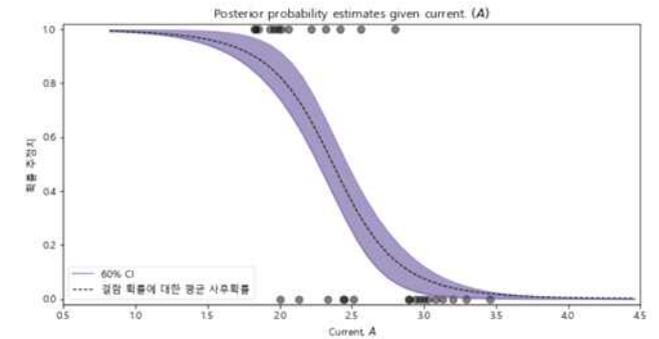
그리고 관측된 데이터, 즉 인가전류에 따른 기폭여부에 대한 데이터를 확률적으로 모델링하기 위해 0(기폭)과 1(미기폭)의 값을 갖는 베르누이 확률함수를 사용하였다.

$$D_i = \text{Bernoulli}(p(c_i))$$

앞서 설명한 확률적 모델들의 모수를 베이지안 기법을 사용하여 추정하였다. 이때 모수를 추정하는 과정에서 발생하는 이중적분 형태의 계산의 어려움 때문에 MCMC(Markov Chain Monte Carlo) 시뮬레이션을 통해 사후확률분포를 따르는 무수히 많은 샘플들을 생성하고 이로부터 표본을 추출할 수 하였다. [그림 2]에 추정된 α 와 β 의 표본 값을 히스토그램으로 작도하였다. 두 모수 모두 초기 값 $\mu = 0$ 에서 벗어나 이동하였으며 이는 확률적 모델링이 적합하였음을 보여준다.

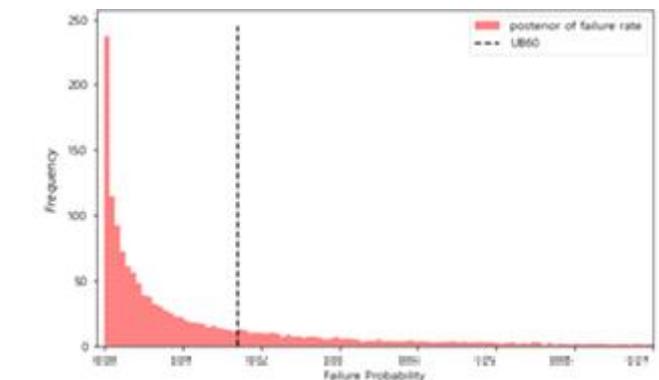


[그림 3] 로지스틱 분포로 모델링한 그래프

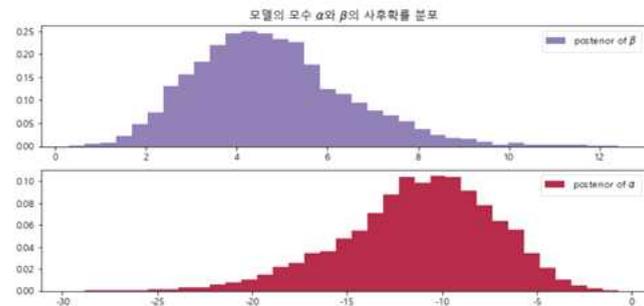


[그림 4] 로지스틱 분포에서 상위 40%를 백터화(60% CI)

시스템 요구사항에서 착화기의 인가 전류는 -A이상 인가하도록 되어있으며 착화기의 신뢰도 하한을 추정하기 위해 인가전류 -A일 때 착화기의 미기폭 확률을 추정하였다. [그림 5]는 MCMC 시뮬레이션을 통해 생성된 샘플들을 통해 인가전류가 -A일 때 착화기의 미기폭 확률에 대해 계산하여 작도한 히스토그램이다. 점선으로 표현한 부분은 신뢰수준 60%에서의 미기폭 확률 0.-----이다. (보안상 정확한 인가전류의 스펙과 미기폭 확률은 표시하지 않았다.)



[그림 5] -A에서의 착화기 미기폭 확률

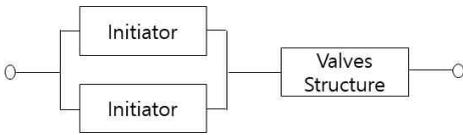


[그림 2] α 와 β 의 사후확률 분포

사후확률분포에서 구한 모든 표본에 대해 평균을 추정하여의 추정 값을 얻을 수 있으며 모델링한 로지스틱분포로 나타내면 [그림 3]과 같다. 신뢰구간을 파악하기 위해 맨 아래부터 상위 40%를 백터화(60% CI)하여 표시하면 [그림 4]와 같다.

시스템에서 사용되는 파이로밸브는 착화기 2개가 병렬로 조립되어 있으며 파이로밸브의 신뢰도블럭도(Reliability

Block Diagram)는 [그림 6]과 같고 계산식은 아래에 기술하였다. $p(-)^2$ 는 -A에서 미기폭 확률이다.



[그림 6] 파이로밸브 신뢰성블럭도

$$R_{Pyro Valve} = 1 - p(-)^2$$

3. 결론

착화기의 인가 전류에 따른 기폭 및 미기폭 확률을 추정하여 파이로밸브의 신뢰도를 추정해보았다. 추정 과정에서 착화기는 인가 전류에 민감하며 파이로밸브의 신뢰성을 확보하기 위해서는 인가 전류의 마진을 충분히 확보하는 것이 필요함을 알게 되었다. 그리고 본 논문에서 활용한 확률적 모델링 기법은 어떤 현상에 대해 경향이 있을 것이라 추정되지만 확신하지 못할 경우 적용할 수 있으며 데이터가 많지 않더라도 베이저안 기법을 사용한다면 빈도주의 통계보다 좋은 추정값을 도출할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 유재한, 이수용 “미국의 파이로밸브 기술에 관한 문헌조사”, 한국추진공학회 학술대회논문집, pp. 630-642, 2013년.
- [2] 캐머런 데이비슨 필론, “프로그래머를 위한 베이저안 with 파이썬”, 길벗, 11월, 2017년.