

# Case Study 3: Aircraft In-Flight Engine Shutdowns

'20. 3. 4.

Youngjun Lee

## 1. Case study Overview

본 내용은 Abernethy 박사가 저술한 “The New Weibull Handbook” 4.6.1 절의 3 번 사례연구를 다룬다. 본 사례연구는 YF26 이라는 가상의 쌍발항공기를 개발하는 과정 중에 발견된 4가지 종류의 엔진 결함을 제시하고 해당 결함의 고장을 예측하는 내용이다. 앞선 사례연구 2가 단일 결함만을 다루었던 것에 비해, 본 사례연구는 복수의 결함을 대상으로 하며, 해당 결함들로 인한 비행중 엔진 정지(IFSD, in-flight shutdown) 확률의 개념이 추가되는 것이 가장 큰 차이라 할 수 있다. 책에 따르면 본 사례연구는 기본적으로 시뮬레이션을 포함하지 않는 고장예측을 목표로 하나, 이미 사례연구 2에서 적용한 바와 같이 Weibull 수명분포 기반의 Monte Carlo simulation을 적용하였다.

## 2. Problem Description

먼저, 엔진에 발생하는 4가지 종류의 결함에 대한 와이불 분석 결과는 표 1 과 같다.

Table 1. Weibull failure modes

Failure Mode	Control	FOD	Bearing	Turbine blade
$\eta$	30000	1200	700	600
$\beta$	0.5	1.0	2.0	6.0

문제에서 제시한 가정사항은 다음과 같다.

- ① 20개의 엔진이 있으며, 10개의 TSN은 10 EFH 이고, 나머지 10개는 20 EFH 이다.
- ② 월간 작동시간은 25 EFH, 즉 25 EFH/month 이다(1 flight = 1 hour = 2 EFH).
- ③ 엔진은 모듈 형태로 구성되어 있으며, 창정비나 교환시 해당 모듈은 TSN “0”의 새로운 모듈로 교체된다. 각각의 고장 유형은 서로 독립적이다.
- ④ 고장 중 1%는 catastrophic crash로 귀결된다. 조종간 작동불능(deadstick-in)시에 도 79%는 안전한 착륙이 가능하다.

- ⑤ Bearing과 Turbine blade의 계획 교체비용은 \$40,000이며, 비계획 교체비용은 \$100,000이다.

### 3. Failure forecast

Q1: 어떠한 고장 유형의 비중이 가장 큰가? 어디에 집중해야 하는가?

Q2: 처음 3년간 얼마나 많은 고장이 발생할 것인가?

상기 질문에 답하기 위해 월별 고장률을 예측해보자. 고장예측에 사용된 식은 사례연구 2에 기술된 식과 동일하다. 일정시간  $t$ 까지의 고장확률함수(또는 Weibull CDF)는 식 (1)과 같고, 시간  $t$ 로부터  $\Delta t$ 만큼 경과한 시점에서의 고장확률은 식 (2)와 같다.

$$F(t) = 1 - \exp(-(t/\eta)^\beta) \quad (1)$$

$$POF = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} \quad (2)$$

상기의 식을 적용한 계통별 고장률을 포함한 시스템 누적 고장률은 그림 1 과 같다.

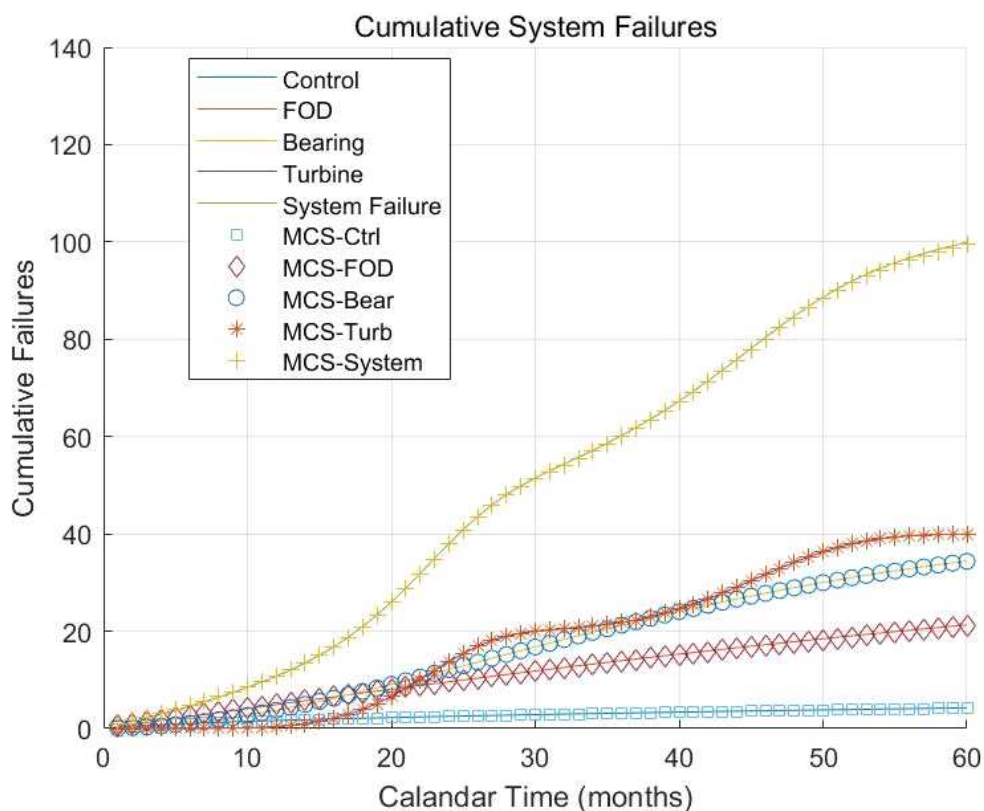


Fig. 1 Cumulative system failures (Weibull\_handbook\_CS\_3.m)

계통별, 그리고 시스템에 대한 월별 고장률은 그림 2 와 같다.

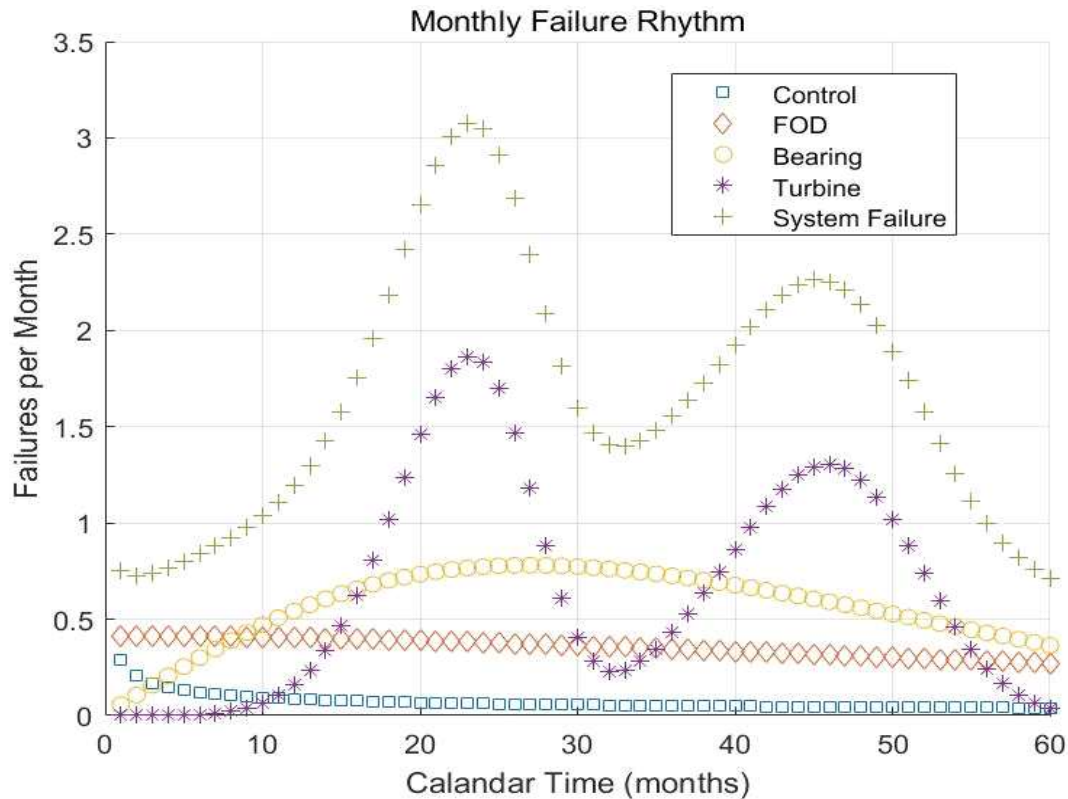


Fig. 2 Monthly failure rhythm (Weibull\_handbook\_CS\_3.m)

그림 1의 실선은 식 (2)로부터 계산된 시스템 및 각 계통의 고장률을 나타내며, 각각의 기호는 MCS 결과를 나타낸다. 그림으로부터 식에 의한 계산 결과와 시뮬레이션 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 두 결과가 매우 잘 일치하므로 그림 2는 시인성을 위해 식에 의한 계산 결과만을 표시하였다.

먼저 그림 2를 살펴보자. 책의 저자가 의도하였겠지만, 4가지 고장 유형은 각각의 형상모수  $\beta$ 가 서로 완전히 상이하다. 타 분포와 비교해 와이블 분포의 가장 큰 특징은 형상모수를 이용해 다양한 종류의 고장시간 분포를 표현할 수 있다는 점이다. 형상모수에 따른 고장 유형의 분류는 책 1.7절 및 2.13 ~ 2.16 절에 자세히 기술되어 있다. 먼저 Control 의 경우 형상모수가  $0.5(< 1)$ 로 infant mortality의 경우이다. 즉, 초기 설계 오류 등과 같이 애초에 문제점을 내포한 경우로 그림 2에서도 초기의 결함률이 높음을 알 수 있다. 하지만 특성수명이 30000으로 매우 높아 그 비율은 크지 않다. 다음으로 bird strike와 같이 전형적인 random failure로 꼽을 수 있는 FOD의 경우 형상모수가 1로

주어져 있고, 그에 따라 고장률은 시간에 관계없이 일정하게 나타난다. Bearing과 Turbine은 형상모수가 1보다 큰 wear out failure이다. 이 중 Bearing의 경우 형상모수가 1에서 4사이의 값을 갖는 early wear out이며, Turbine의 경우 형상모수가 4를 초과하는 rapid wear out의 경우이다. 이러한 차이로 인해 Turbine의 경우 Bearing에 비해 급격한 고장률의 증가를 보인다.

이어서 그림 2의 rhythm을 보면 Turbine의 경우 좌측과 우측에 두 개의 봉우리가 솟는 부분을 볼 수 있다. 그림 1의 누적결함을 보면 Turbine이 약 30개월 즈음의 시점에 전체 population에 해당하는 20개 만큼의 고장이 발생함을 알 수 있다. 그림 1, 2의 그래프의 좌측 절반에 해당하는 부분만을 살펴보면, 그림 1의 경우 전형적인 초도부품 고장 CDF의 형태이고 월별로 구분한 그림 2의 경우 초도부품 고장 PDF에 해당한다. 즉, 작동 이후 초기 30개월까지는 초도부품의 고장을 의미하며, 그림 2의 30개월 이후에 나타나는 두 번째 봉우리(결함분포)는 초도 결함품만큼 추가한 신규부품의 고장을 나타낸다. 그리고 이러한 부분이 반영되어 그림 1의 경우 처음 30개월까지 초도부품의 CDF가 나타나며, 이후 30개월은 여기에 추가된 신규부품의 CDF가 중첩되어 있는 형태를 띤다. System failure의 경우 각각의 고장유형은 독립적이기 때문에 4가지 고장유형의 고장률을 단순히 합해서 구할 수 있다.

책에서 언급한 Q1에 대한 해답은 그래프에서 알 수 있듯이 Turbine이 가장 주요한 고장 요인이며, Q2에 대한 해답은 51.474 이다.

#### 4. Probability of Crash

Q3: 초도 1년간 쌍발 엔진 모두의 비행중 엔진 정지 확률은 얼마인가? 조종간 작동불능시 안전한 착륙확률이 79%인 점을 고려할 때 쌍발 엔진 모두의 비행중 엔진 정지가 항공기 추락으로 이어질 확률은 얼마인가?

먼저 그림 1에서 12개월에 해당하는 system(engine) failure의 수는 10.6 이다<sup>1)</sup>. 총 20개 엔진의 월별 작동시간은 25 EFH 이므로 월간 작동시간의 총합은 500 EFH 이고, 연간 작동시간은 6000 EFH 이다. 문제의 가정사항 ②에 따르면 이는 3000 flight에 해당한다. 그러므로 초도 1년간 IFSD 발생 확률은  $10.6 / 3000 = 0.00353$  이다. 다음으로

---

1) matlab 실행결과 12개월의 system failure는 10.7457 로 산출되었지만, 독자들의 이해를 돕기 위해 책과 같이 10.6 으로 계산하였다.

쌍발 엔진 모두의 IFSD 확률은 두 엔진 모두에서 IFSD가 발생한 확률이므로,  $0.00353^2 = 0.0000125$  이다.

연간 3000 비행당 dual IFSD의 확률은 다음의 식처럼 구할 수 있다.

$$1 - (1 - 0.0000125)^{3000} = 0.0368 \quad (3)$$

전체적인 식의 구성은 “1 - 생존율 = 고장률”이다. 여기서 괄호 안의  $1 - 0.0000125$  는 개별 비행에서의 생존률(dual IFSD가 발생하지 않을 확률)을 의미한다. 그리고 총 3000 비행동안 매비행시 동일한 확률이 적용되므로, 총 3000 비행에서 dual IFSD가 발생하지 않을 확률은  $(1 - 0.0000125)^{3000}$  이다. 최종적으로 연간 dual IFSD의 발생확률은 0.0368 이다. 가정사항 ④에 주어진 바와 같이 dual IFSD로 인한 조종간 작동불능 (deadstick-in)시에도 79%는 안전한 착륙이 가능하다. 즉 dual IFSD 발생시 0.21만큼의 crash가 일어난다. 그러므로 초도 1년간 dual IFSD로 인한 crash 확률은  $0.0368 \times 0.21 = 0.008$  이다.

여기까지 내용을 모두 이해하였다면 이후의 Q4 ~ 6 에 대한 이해와 풀이는 자연스레 가능할 것이다.