Society of Korea Industrial and Systems Engineering Vol. 36, No. 4 : 100-108, December 2013 ISSN : 2005-0461(print)
http://dx.doi.org/10.11627/jkise.2013.36.4.100 ISSN : 2287-7975(online)

A Study on Reliability Growth through Failure Analysis by Operational Data of Avionic Equipments

In-Tak Jo* · Sang-Cheon Lee**† · Jong Hun Park***

*Korea Aerospace Industries, LTD.,
**Division of Industrial Systems Engineering, ERI, Gyeongsang National University
***Department of Business Administration, Catholic University of Daegu

항공전자장비의 운용자료 분석을 통한 신뢰성 성장 연구

조인탁* · 이상천**† · 박종훈***

*한국항공우주산업, 수석연구원
**경상대학교 산업시스템공학부 교수, 공학연구원
***대구가톨릭대학교 경영학과

In aerospace industry, MTBF (Mean Time Between Failure) and MFTBF (Mean Flight Time Between Failure) are generally used for reliability analysis. So far, especially to Korean military aircraft, MFTBF of avionic equipments is predicted by MIL-HDBK-217 and MIL-HDBK-338, however, the predicted MFTBF by military standard has a wide discrepancy to that of real-world operation, which leads to overstock and increase operation cost. This study analyzes operational data of avionic equipments. Operational MFTBF, which is calculated from operational data, is compared with predicted MFTBF calculated conventionally by military standard. In addition, failure rate trend is investigated to verify reliability growth in operational data, the investigation shows that failure rate curve from operational data has somewhat pattern with decreased failure rate and constant failure rate.

Keywords : Aerospace Reliability, Failure Rate Trend, MFTBF, MIL-HDBK-217F, Reliability Growth

1. 서 론

항공전자장비는 항공기에 장착되는 장비로서 EGI(Embedded GPS/INS)와 같은 센서장비나 TACAN(Tactical Air Navigation)과 같은 항법 장비를 포함해 다양한 통신 및 계측 장비들과 이러한 장비들을 통합/제어하기 위한 컴퓨터 등으로 구성된다. 이러한 항공전자장비는 주로 레지스터(register), 트랜지스터(transistor) 등의 소자로 이루어져 있기 때문에 주변 환경 및 온도, 스트레스 그리고 진동 등에 영향을 많이 받는다. 따라서 항공기의 고장 및 신뢰성분석에서 전자장비에 대한 관심은 클 수밖에 없다.

항공기를 대상으로 하는 고장 및 신뢰성 분석에서 주로 사용되는 신뢰성 지표는 MTBF(Mean Time Between Failure)와 MFTBF((Mean Flight Time Between Failure)가 대표적이며, 초기에는 임무성공률(mission success rate)과 가동률(availability) 관점에서 해당 지표들을 계산하고 관리하려는 노력들이 주를 이루었으나, 항공기 운용에 대

Received 14 November 2013; Accepted 4 December 2013
† Corresponding Author : sclee@gnu.ac.kr

한 경험이 쌓이고 어느 정도의 운용자료를 확보한 최근에는 운용유지비용 및 장비의 소요예측 관점에서 신뢰성 분석을 활용하려는 시도가 이어지고 있다[4, 6]. 그러나 현재의 국내 군수용 항공기 산업은 밀리터리규격(Military standard)을 사용하여 장비의 기초적인 신뢰성 지표를 예측하는 정도의 신뢰성 예측을 수행하고 있는 수준에 머물러 있다.

일반적으로 개념설계, 상세설계, 생산 등 개발단계의 분기점(Milestone)에서 승인(Approval) 또는 의사결정이 이루어지며, 이 때 경영자(또는 계약자)에게 신뢰성 성장 프로그램의 진행상황이 보고되어야 한다. 이 보고에는 신뢰성 분석, 시험 및 계획된 개선활동에 기초한 신뢰성 예측이 반드시 포함되어야 하며, 이로부터 신뢰성 목표와 예측 신뢰성 사이에 예상되는 차이를 조기에 파악할 수 있다. 이러한 신뢰성예측을 위해서는 시스템을 구성하는 부품들의 기능 및 상태를 확인하고, 해당시스템이 사용될 환경 조건을 고려하여 부품들의 고장시기를 예측한 후, 부품들의 구조적 관계를 고려하여야 한다[5, 9, 10].

항공기 개발에서도 납품하기 전에 항공기의 여러 장비에 대하여 신뢰성을 예측함으로써 고객이 원하는 수명을 만족하는 지의 여부를 가늠하게 되는데, 국산 군수용 항공기의 경우 주로 MIL-HDBK-217F[11]와 MIL-HDBK-338B[12]와 같은 밀리터리규격에 의존하여 MTBF와 MFTBF를 예측한다. 그러나 MIL-HDBK-217F의 경우에는 1990년대 중반 이후로는 더 이상 개정이 안 되고 있는 상황이고, 전자부품은 그 이후에도 급속하게 성능과 품질이 향상될 뿐 아니라 그 종류도 다양화된 관계로 밀리터리규격을 적용하여 예측된 값이 실제 운용값과 상당한 차이를 보이는 품목이 다수 존재하는 상황이다.

결론적으로, 더 이상 개정되지 않는 과거의 밀리터리규격을 적용한 신뢰성예측은 그 정확도가 점점 떨어지고 있는 추세이며[3], 이에 국내외 항공기산업에서는 이를 보완하기 위해 운용자료를 활용하는 방안을 논의하고 있다[15].

이러한 시기적 흐름에 맞추어, 본 연구에서는 실제 운용되고 있는 항공기 중 국내에서 개발된 군용훈련기의 항공전자장비의 운용자료를 사용하여 신뢰성 척도인 운용 MFTBF를 계산하고 고장률추세를 관찰함으로써 국내항공전자장비의 신뢰성이 안정화되는 과정을 분석하는 신뢰성 성장분석을 수행하고자 하였다. 이러한 시도는 항공전자장비의 국내 운용자료를 분석한 최초의 시도라는 점에서 그 가치가 있다고 판단되며, 연구결과는 예측의 정확도가 저하되고 있음을 알면서도 다른 대안이 없어 과거의 밀리터리규격을 사용해 왔던 국내 항공기산업에 최근의 기술수준과 국내의 운용환경이 반영된 참고값(reference value)을 제공한다는 점에서 기여점이 예상된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 국내 항공기산업에서 현재까지도 일반적으로 사용되고 있는 신뢰성 예측방법, 즉 밀리터리규격이나 선진업체들에 의해 제공되는 참고값(reference value)에 의존하여 군수용 항공기의 신뢰성을 예측하는 방법을 소개하였으며, 제 3장에서는 현재 국내에서 개발되어 운용하고 있는 군용훈련기의 운용자료를 활용하여 항공전자장비가 통계적으로 유의하다고 판단될 정도의 고장수를 가진 장비들의 운용 MFTBF를 계산하고, 그 결과를 기존에 사용하던 밀리터리규격을 사용한 초기의 신뢰성 예측 결과와 비교한 후, 해당 장비들의 고장률 추세를 분석함으로써 신뢰성 성장분석을 실시하였다. 마지막으로 제 4장에서는 이상의 분석결과를 정리하고 연구의 제한점 및 연구결과의 향후 활용방안을 소개하였다.

2. 연구 배경

본 장에서는 국내 항공기산업에서 현재까지도 일반적으로 사용되고 있는 신뢰성 예측방법, 즉 밀리터리규격이나 선진업체들에 의해 제공되는 참고값(reference value)에 의존하여 군수용 항공기의 신뢰성을 예측하는 방법을 소개하였다.

2.1 MIL-HDBK-217F를 이용한 고장률 예측

MIL-HDBK-217F는 전기/전자 부품의 신뢰도 평가 척도와 계산 방법을 보유하고 있는 규격서로서, 전기 및 전자 구성품의 신뢰도 예측에 있어 정형화된 분석의 가이드라인(Guideline)을 제공하고 있으며[14], 현재까지 국내 항공기산업에서는 해당규격에 의존하여 항공기전자장비의 신뢰성을 예측하고 있다. MIL-HDBK-217F는 부품의 고장분포가 지수분포를 따른다고 가정하여 작성되어 있으며, 각 구성 부품들의 고장률의 합으로 그 상위 수준의 유닛(unit)과 시스템의 신뢰도가 결정된다.

MIL-HDBK-217F에서는 시스템개발의 진척정도에 따라 Part Count와 Part stress 방법의 두 가지 방법을 제안하고 있으며, 개략적인 내용은 다음과 같다[4].

2.1.1 Part count analysis 기법

Part count analysis 기법은 시스템초기 설계에 필요한 개략적인 예측방법으로, 시스템을 구성하게 될 구성품에 대해 대략적인 개념은 세워져 있으나 각 구성품이 최종 설계단계에서 또는 운용 시 받게 될 스트레스(stress) 등에 대한 정보가 충분하지 않아 실제 동작 파라미터에 대한 정확한 값을 추정하기 힘든 경우에 활용하는 방법으로, 식 (1)에서 볼 수 있듯이, 각 구성품에 대하여 최소 파라

미터만으로도 초기의 고장률을 예측한다.

$$\lambda_{equipment} = \sum_{i=1}^{n} N_i (\lambda_g \pi_Q)_i \quad (1)$$

where,

$\lambda_{equipment}$: 장비 고장률(Failure/10^6hr)
λ_g : i번째 부품의 고장률(Failure/10^6hr)
π_Q : i번째 부품의 품질계수(Failure/10^6hr)
N_i : i번째 부품의 수량

2.1.2 Part stress analysis 기법

Part stress analysis기법은 시스템 완성 단계에서 완성된 시스템과 부품의 상세설계에 따른 고유 규격(specification)과 고장률에 영향을 많이 주는 다양한 파라미터를 고려하여 예측하는 방식으로, 부품이 처하게 될 온도, 습도, 진동 등의 스트레스와 부품고장에 영향을 미치는 요인을 파악하고, 식 (2)를 활용하여 초기의 고장률을 예측한다.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E \quad (2)$$

where,

λ_p : 부품의 고장률(Failure/106hr)
λ_b : 부품에 가해지는 전기적 스트레스와 온도스트레스의 영향을 고려한 모델로부터 얻어지는 부품의 기본적인 고장률(Failure/10^6hr)
π_T : 부품에 영향을 주는 온도인자
π_A : 부품에 영향을 주는 Application 인자
π_R : 부품에 영향을 주는 Power Rating 인자
π_S : 부품에 영향을 주는 Stress 인자
π_C : 부품에 영향을 주는 Complexity 인자
π_Q : 부품에 영향을 주는 품질인자
π_E : 부품에 영향을 주는 환경인자

2.2 MFTBF 산출

MIL-HDBK-217F는 부품의 고장분포가 지수분포를 따른다고 가정하고 있으므로, 그 역수를 취함으로써 MTBF를 계산할 수 있다. 그러나 항공기산업에서는 MTBF보다는 비행시간을 고려한 MFTBF가 더 의미 있는 신뢰성척도로 사용된다. 따라서 시간(time)을 비행시간(Flight time)으로 환산하는 과정이 필요한데, 이때의 환산비율은 부품의 종류에 따라 상이하다. 따라서 해당 부품에 대해 유사성을 인정 할 수 있는 유사/선진 항공기 자료가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 따라 MFTBF를 산출하는 방법에 차이가 존재한다.

2.2.1 유사항공기 운용자료 부재

해당부품에 대해 유사성을 인정할 만한 유사항공기의 운용자료가 존재하지 않을 경우에는 MTBF에 온도/환경조건과 MIL-HDBK-338을 활용한 필드조건을 반영하여 MFTBF를 산출한다. 이 과정은 아래와 같다[4, 7].

Step 1 : MIL-HDBK-217F를 이용하여 신뢰성을 예측한다.
Step 2 : 온도/환경조건을 검토하여 반영한다.
Step 3 : MIL-HDBK-338을 활용하여 필드조건으로 변환한다.
Step 4 : 항공기의 단위 비행시간(Flight Hour)당 해당 부품의 작동시간(Operation Time)비율을 계산한다.
Step 5 : Step 4에서 계산된 작동시간비율을 부품 작동시간의 MTBF를 항공기 비행시간의 MFTBF로 단위 변환 시 적용한다. 이때 단위변환 공식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{MFTBF} = \frac{1}{MTBF_{FIELD}} \times \text{시간환산비율}$$

Step 6 : 항공기에 장착된 수량을 적용하여 최종 MFTBF를 산출한다.

2.2.2 유사항공기의 운용자료 존재

부품의 종류에 따라서는 해당부품에 대해 유사성을 인정할 만한 선진항공사의 유사항공기 운용자료가 존재 할 수 있다. 이러한 경우 해당 자료로부터 MFTBF를 계산하고, 그 값에 국내항공기와 선진항공사간의 MTBF 비율, 운용조건비율, 운용복잡성비율 등을 반영함으로써 MFTBF를 산출한다. 이 과정은 다음과 같다[4].

Step 1 : 선진사 운용사의 MFTBF를 확인한다.
Step 2 : MIL-HDBK-217F를 이용하여 국내항공기와 선진사항공기의 MTBF 비율 Factor를 계산한다.
Step 3 : 운용환경 factor를 산출한다.
Step 4 : 운용복잡성 factor를 산출한다.
Step 5 : Step 2-4에서 계산한 factor들을 곱하여 최종 복잡성 factor를 정의한다(복잡성 factor = MTBF 비율×환경 factor×운용factor).
Step 6 : 선진사 운용 MFTBF에 Step 5의 최종복잡성 Factor를 곱하여 MFTBF를 산출한다(MFTBF = 선진사 MFTBF×복잡성 factor).

3. 운용자료 분석

본 장에서는 현재 국내에서 개발되어 운용하고 있는 군용훈련기의 운용자료 중, 항공전자장비가 통계적으로 유의하다고 판단될 정도의 고장수를 가진 장비 6품목을 대상으로 운용 MFTBF를 계산하고 그 결과를 밀리터리 규격을 사용한 초기의 신뢰성 예측 결과와 비교 후, 운용시간에 따른 평균고장률의 변화를 관찰하는 방법으로 해당 품목들의 신뢰성 성장을 분석하고 고찰하였다.

평균고장률은 동일부품의 총누적운용시간(cumulative Flight time)에 대한 총고장수의 비율을 계산함으로써 구한다. 예를 들어 동일부품 10개가 각각 서로 다른 비행기에 탑재되어 운용되었다면, 특정시점에서의 총누적운용시간은 해당부품이 탑재된 10개 비행기 각각의 해당시점까지의 비행시간들의 합이고, 총고장수는 해당시점까지 해당부품들에 발생한 고장수의 합을 의미한다. 따라서 전자를 분자로, 후자를 분모로 계산하면 해당 운용시간까지의 평균고장률을 계산할 수 있다. 항공기 산업에서는 MFTBF가 일반적인 신뢰성 척도로 사용되므로 평균고장률은 식 (3)과 같이 MFTBF를 사용하여서도 표현할 수 있다.

$$\text{평균고장률} = 1/\text{누적}MFTBF \times 10^6 \qquad (3)$$

식 (3)에서 MFTBF를 10^6배 한 것은 현재 국내 군수용 항공기 산업에서 초기 신뢰성 예측을 위해 일반적으로 참고하는 밀리터리규격의 고장률 단위를 맞추기 위한 것이다[11].

이렇게 계산된 평균고장률이 운용시간이 증가함에 따라 변화하는 패턴을 확인함으로써 제품의 신뢰성의 변화를 확인하였다. 즉 평균고장률이 증가하는 패턴을 보이면 이는 시간이 흐를수록 고장발생 횟수가 증가하고 있음을 의미하므로 해당 제품의 신뢰성이 점진적으로 저하되고 있음을 나타낸다. 같은 맥락에서 평균고장률이 감소하는 패턴을 보이면 이는 해당제품의 신뢰성이 점진적으로 성장하고 있음을, 평균고장률이 일정하면 이는 해당제품의 신뢰성이 안정화되었음을 의미한다.

시스템을 개발하여 운용하는 경우, 초반에는 신뢰성(고장률)이 성장(감소)하다 일정시점이 지난이후 안정화되는 것이 일반적이다. 따라서 본 장에서는 항공전자장비의 실제 국내 운용자료로부터 고장률추세를 도출하여 신뢰성의 성장과 안정화가 실현되고 있는지 확인하고, 각각의 기간을 신뢰성 성장구간과 안정화구간으로 구분하여 정의함으로써 향후 항공기의 효율적 운용을 위한 바람직한 적용방향을 모색하는 것을 목적으로 운용자료를 분석하였다.

3.1 초기 신뢰성 예측과 운용 MFTBF의 비교

본 절에서는 현재 국내에서 개발되어 운용하고 있는 군용훈련기의 운용자료를 활용하여 항공전자장비가 통계적으로 유의하다고 판단될 정도의 고장수를 가진 장비 6품목을 대상으로 운용 MFTBF를 계산하고 그 결과를 밀리터리규격을 사용한 초기의 신뢰성 예측 결과와 비교하였다. <Table 1>은 그 내용을 개략적으로 나타낸 것이다.

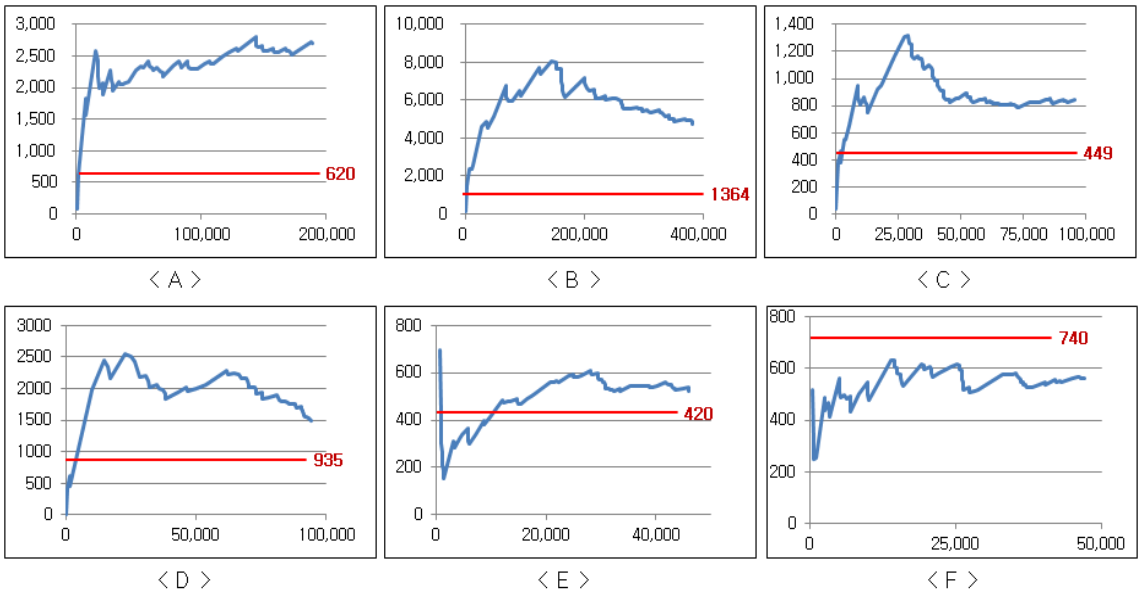
여기서 A~D품목은 유사항공기의 운용자료가 부재한 품목이기 때문에 본 논문의 제 2.2.1절에서 소개한 방법으로 MFTBF를 예측하였으며, E와 F품목은 유사항공기의 운용자료가 존재하여 제 2.2.2절에서 소개한 방법을 사용하여 MFTBF를 예측하였다. <Table 1>에서 볼 수 있듯이 밀리터리규격이나 유사항공기의 자료를 참고하여 예측한 MFTBF와 운용자료로부터 추정한 MFTBF 간에는 차이가 있음을 알 수 있고 특히 유사항공기의 운용자료가 부재한 A~D 품목이 차이가 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

더욱 구체적인 분석을 위하여 6개 품목에 대하여 실제 운용하면서 발생한 고장발생수와 그 시기를 수집하여 시간의 흐름에 따른 누적 MFTBF의 추세를 <Figure 1>에서와 같이 그래프로 시현하고 그 결과를 예측 MFTBF와 비교하였다.

A품목의 경우, 시간이 지날수록 예측 MFTBF와 운용 MFTBF의 차이가 점점 벌어지고 있음을 관찰할 수 있으며, B~D품목은 초기에는 큰 차이를 보이다가 일정시간 후에는 다소 차이가 감소하지만 여전히 큰 차이를 보이고 있으며, E와 F품목은 차이가 발생하지만 예측과

<Table 1> Comparison of Predictive and Estimative MFTBFs

Section		A	B	C	D	E	F
Failure Number		70	81	114	63	88	84
Operating hour		189,150	382,066	95,645	94,380	46,049	47,225
MFTBF	Prediction	620	1,364	449	935	420	740
	Operation	2,702	4,717	839	1,498	523	562



<Figure 1> Comparison of Predictive and Estimative MFTBFs(Horizontal Axis : Operating Hour, Vertical Axis : Cummulative MFTBF)

어느 정도 근접한 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 다음과 같이 추정할 수 있다.

1) 예측 시 사용하는 규격서인 MIL-HDBK-217[11]는 앞서 언급하였듯이 1990년대 이후 개정이 이루어지지 않고 있으므로 규격서에 수록된 참고값이 최근 개발된 장비의 부품소자의 특성을 반영하지 못할 수 있다.
2) 식 (1)과 식 (2)에서 볼 수 있듯이, 신뢰성 예측 시 시스템의 고장률은 영향인자들의 곱으로 계산하기 때문에 인자 한개만 잘못 가정하여도 수배의 차이를 보일 수 있다.
3) E와 F품목의 경우 유사항공기의 운용자료를 활용하였기 때문에 다소 차이를 줄일 수 있었던 것으로 추정된다.
4) 항공기의 경우 전투기와 수송기로만 구분되어 있을 뿐, 훈련기에 대한 영향계수는 존재하지 않는다. 따라서 훈련기와 전투기는 그 운용방식에 큰 차이가 존재함에도 불구하고 예측을 위해서는 전투기의 요인값(factor)을 사용할 수밖에 없으며, 이 경우 신뢰성 척도가 보수적으로 계산될 여지가 많다.

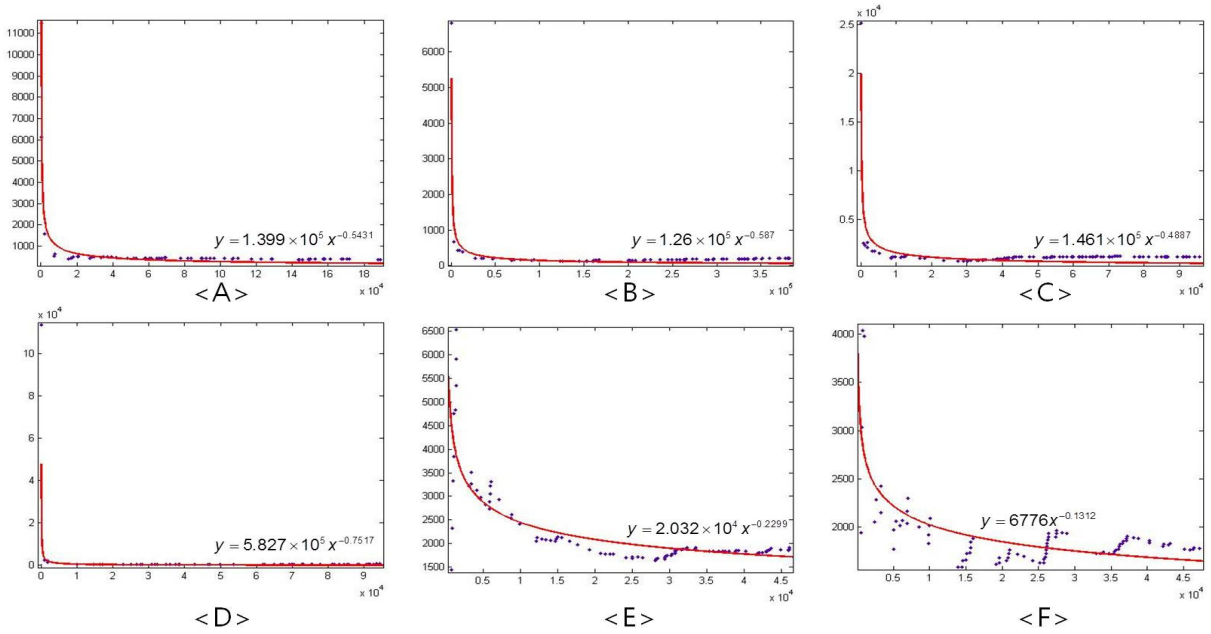
이러한 이유로 인해, 운용자료가 존재하지 않는 개발 및 운용 초기에는 예측 신뢰성값을 사용할 수밖에 없지만, 항공기의 실제 운용자료의 수집이 가능해지면 운용자료로부터 신뢰성 척도를 획득하는 것이 더욱 효과적일 것이라 판단된다.

3.2 운용자료 고장률 추세 및 신뢰성 성장분석

본 절에서는 <Table 1>에서 소개된 A~F부품의 운용자료를 사용하여 해당 부품들의 고장률 추세를 살펴보는 방법으로 신뢰성 성장분석을 수행하였다. 신뢰성 성장에 대해서는 여러 가지 이론들이 존재하지만, 항공전자장비와 같이 수리가능한 품목의 신뢰성 성장분석에서는 AMSAA 모형과 Duane 모형이 주로 사용되고 있으며[1, 2, 5, 8, 16], 본 연구에서는 국내 항공기산업에서 현재까지도 참고하고 있는 밀리터리규격이 채택하고 있는 Duane모형에 근거하여 샘플 품목의 각 품목별 추세선을 모형화하였다[11, 13].

Duane[2]은 고장시간이 지수분포를 따른다고 가정하고 있으며, 고장률 추세의 수학적 모형은 $y = ax^{-b}$의 형태로 정의하였다. 6개 품목의 운영자료를 입력자료로 가우스뉴튼법(Gauss Newton method)을 사용하여 해당모형의 계수들을 추정한 결과를 <Table 2>에 정리하였다.

<Figure 2>는 A~F부품 각각에 대하여 운용시간의 변화에 따른 평균고장률의 변화와 그 추세선을 도시한 것이다. <Figure 2>에서 볼 수 있듯이, 6개 품목 모두가 $y = ax^{-b}$의 형태를 가정하는데 큰 무리가 없다고 판단되며, 고장률 추세를 살펴보면, 6개 품목 모두에서, 초기에는 급격하게 고장률이 감소하다가 일정시간이 지난 후에 안정화되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 운용초기에 신뢰성이 성장을 하다 일정시점이 지나면 안정화됨을 의미하며, 결론적으로 운용시간의 변화에 따라 <Figure 3>과 같이 신뢰성 성장구간과 안정화구간으로 구분될 수 있음을 시사한다.



<Figure 2> The Failure-rate Curves of A-F(Horizontal Axis : Operating Hour, Vertical Axis : Cumulative Failure Rate)

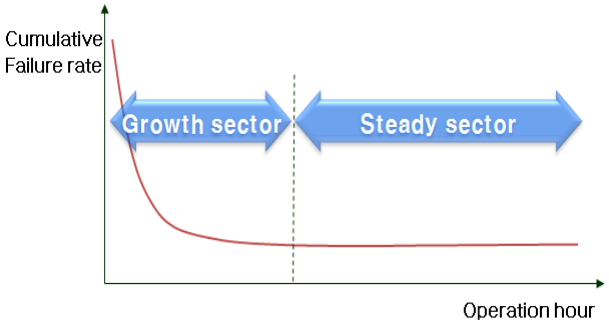
<Table 2> The Result of Failure-rate Curve Estimation with 95% Confidence Bounds

Item	Mathematical model coefficient			
		value	lower bound	upper bound
A	a	1.399×10^5	9.23×10^4	1.874×10^5
	b	0.5431	0.6026	0.4835
B	a	1.26×10^5	1.077×10^5	1.443×10^5
	b	0.587	0.6138	0.5602
C	a	1.461×10^5	1.304×10^5	1.618×10^5
	b	0.4887	0.5089	0.4684
D	a	5.827×10^5	5.424×10^5	6.23×10^5
	b	0.7517	0.7833	0.7202
E	a	2.032×10^4	1.356×10^4	2.707×10^4
	b	0.2299	0.267	0.1928
F	a	6776	5199	8354
	b	0.1312	0.1558	0.1067

또한, <Figure 2>의 각 품목들의 고장률 추세와 <Table 2>의 결과를 살펴보면 재미있는 점이 관찰된다.

$y = ax^{-b}$의 고장률 추세모형에서 b는 성장기울기(Growth Rate)를 의미하며, 군사장비의 경우 운용자료의 과거 성장기울기가 일반적으로 0.2~0.6사이의 분포를 형성한다고 알려져 있고 항법시스템의 네비게이션(Navigation)을 대상으로 한 Crow[1]의 연구에서 0.26, 0.24, 0.53 등의 값이 도출되기도 하였다.

<Figure 2>에서 초기의 고장률 감소시점이 지나고 안정화 시점이 도래한 듯 보이는 A~D 품목의 성장기울기가 0.4887~0.7517의 범위값을 보이고, 상대적으로 안정화 시점에 도달했다고 판단하기에는 미흡한 듯 보이는 E와 F 품목의 성장기울기가 각각 0.2299와 0.1312이며, 특히 안정화 시점이 가장 일찍 도래한 듯 보이는 D 품목의 성장기울기가 0.7517로 가장 크고, 안정화가 가장 늦은 것으로 보이는 F 품목이 0.1312인 점을 감안할 때, 성장기울기가 해당 시스템의 안정화를 판단하는 기준으로 고려 될 수 있음을 의미한다. 그러나 겨우 6개의 품목을 관찰한 결과로는 성장기울기가 판단기준으로서 가치가 있음을 판단하는 정도의 결론만을 도출 할 수 있을 뿐, 판단기준이 되는 기준값을 도출하거나 추가적인 고찰을 하기에는 어려움이 존재한다. 따라서 향후 다양한 품목의 운용자료가 수집된 후의 연구주제로써 남겨두고자 한다.



<Figure 3> Failure-rate Curve and Reliability Growth

<Table 3> The First and Second Order Differential Values of Failure-rate Curve with Respect to Operation Hours

ITEM	A		B		C		D		E		F	
Operating hour	1st order	2nd order	1st order	2nd order	1st order	2nd order	1st order	2nd order	1st order	2nd order	1st order	2nd order
5000	0.14887	4.59E-05	0.09971	3.16E-05	0.22235	6.62E-05	0.14521	5.09E-05	0.13186	3.24E-05	0.05816	1.32E-05
10000	0.05109	7.88E-06	0.03319	5.27E-06	0.07923	1.18E-05	0.04312	7.55E-06	0.05622	6.91E-06	0.02655	3.00E-06
15000	0.02733	2.81E-06	0.01744	1.85E-06	0.04333	4.30E-06	0.02119	2.48E-06	0.03414	2.80E-06	0.01678	1.27E-06
20000	0.01753	1.35E-06	0.01105	8.77E-07	0.02823	2.10E-06	0.01280	1.12E-06	0.02397	1.47E-06	0.01212	6.86E-07
25000	0.01242	7.67E-07	0.00775	4.92E-07	0.02025	1.21E-06	0.00866	6.07E-07	0.01822	8.96E-07	0.00942	4.26E-07
30000	0.00938	4.82E-07	0.00581	3.07E-07	0.01544	7.66E-07	0.00629	3.67E-07	0.01456	5.97E-07	0.00766	2.89E-07
35000	0.00739	3.26E-07	0.00455	2.06E-07	0.01227	5.22E-07	0.00480	2.40E-07	0.01204	4.23E-07	0.00644	2.08E-07
40000	0.00602	2.32E-07	0.00368	1.46E-07	0.01006	3.74E-07	0.00380	1.67E-07	0.01022	3.14E-07	0.00553	1.57E-07
45000	0.00502	1.72E-07	0.00305	1.08E-07	0.00844	2.79E-07	0.00309	1.20E-07	0.00884	2.42E-07	0.00484	1.22E-07
50000	0.00426	1.32E-07	0.00258	8.19E-08	0.00722	2.15E-07	0.00257	9.01E-08	0.00777	1.91E-07	0.00430	9.73E-08
55000	0.00368	1.03E-07	0.00222	6.40E-08	0.00626	1.69E-07	0.00218	6.93E-08	0.00691	1.54E-07	0.00386	7.94E-08
60000	0.00322	8.28E-08	0.00193	5.11E-08	0.00550	1.36E-07	0.00187	5.46E-08	0.00621	1.27E-07	0.00350	6.60E-08
65000	0.00284	6.75E-08	0.00170	4.16E-08	0.00488	1.12E-07	0.00162	4.38E-08	0.00562	1.06E-07	0.00320	5.56E-08
70000	0.00254	5.59E-08	0.00151	3.43E-08	0.00437	9.30E-08	0.00143	3.57E-08	0.00513	9.02E-08	0.00294	4.75E-08
75000	0.00228	4.69E-08	0.00136	2.87E-08	0.00395	7.83E-08	0.00126	2.95E-08	0.00472	7.73E-08	0.00272	4.10E-08
80000	0.00206	3.98E-08	0.00122	2.43E-08	0.00358	6.67E-08	0.00113	2.47E-08	0.00436	6.70E-08	0.00253	3.57E-08
85000	0.00188	3.41E-08	0.00111	2.08E-08	0.00328	5.74E-08	0.00102	2.09E-08	0.00404	5.85E-08	0.00236	3.14E-08
90000	0.00172	2.95E-08	0.00102	1.79E-08	0.00301	4.98E-08	0.00092	1.79E-08	0.00377	5.15E-08	0.00221	2.78E-08
95000	0.00158	2.57E-08	0.00093	1.56E-08	0.00278	4.35E-08	0.00084	1.54E-08	0.00353	4.57E-08	0.00208	2.48E-08
100000	0.00146	2.26E-08	0.00086	1.36E-08	0.00257	3.83E-08	0.00076	1.34E-08	0.00331	4.07E-08	0.00196	2.22E-08
105000	0.00136	1.99E-08	0.00080	1.20E-08	0.00239	3.39E-08	0.00070	1.17E-08	0.00312	3.65E-08	0.00186	2.00E-08
110000	0.00126	1.77E-08	0.00074	1.07E-08	0.00223	3.02E-08	0.00065	1.03E-08	0.00294	3.29E-08	0.00176	1.81E-08

3.3 운용자료 신뢰성 성장분석의 고찰

제 3.2절에서의 6개 품목에 대한 고장률 추세분석을 통해, 초기에는 급격하게 고장률이 감소하다가 일정시간이 지난 후에 안정화되어지고 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 <Figure 3>에서 개략적으로 도시한 바와 같이 신뢰성이 성장을 하는 운영초기의 신뢰성 성장구간과 일정시점 이후 신뢰성이 안정화되는 안정화구간으로 구분될 수 있음을 시사한다. 즉, 일정시점까지는 Duane[2]의 성장이론을 충실히 따라 신뢰성이 성장하지만, 어느 시점이 지나면 더 이상 성장하지 않고 안정화구간에 접어듦을 알 수 있었다.

그런데, 국산 항공기에 장착되어 운용되는 항공전자장비와 관련되어서는 운용자료를 분석한 선행연구가 존재하지 않은 관계로, 신뢰성 성장구간과 안정화구간을 구분 할 수 있는 기준이 많지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 성장구간과 안정화구간을 정의하기 위한 탐색적 연구를 시도하였다.

신뢰성 성장구간과 안정화구간을 구분 할 수 있는 기준이 많지 않은 현재로써는 성장구간과 안정화구간을 구분하는 방법은 <Figure 2>에서와 같이 추세선을 도시하고 관찰자의 주관적인 판단에 의존할 수밖에 없다. 이러한 주관적 판단은 일관된 판단기준을 제시 할 수 없으므로 합리적인 기준이라 할 수 없다. 그러나 관찰자들이 성장구간과 안정화구간을 판단하는 기준은 추세선의 변화율, 즉 고장률의 변화율에 대한 주관적인 판단에 기인할 것이다. 따라서 본 연구에서는 A~F품목의 추세선에 대한 고장률의 순간변화율을 고찰하는 탐색적 연구를 시도하였다. 즉 ax^{-b}로 정의된 고장률추세를 1차 미분한 $-abx^{-(b+1)}$와 2차 미분한 $ab(b+1)x^{-(b+2)}$를 관찰하였다.

<Table 3>은 A~F 품목별 시간의 변화에 따른 1차 미분계수와 2차 미분계수를 계산한 결과이다. 고장률추세선이 단조감소의 특징을 가지고 있고 변화량은 음수값을 가지며, 운용시간이 증가함에 따라 고장률이 특정값으로 수렴하는(신뢰성이 안정화되는) 특징을 가지므로 1차 미분계수의 절대값($|-abx^{-(b+1)}|$)과 2차 미분계수는 계속 작아지고 있음을 확인 할 수 있다.

모든 품목에 대하여 고장률 함수의 2차 미분계수가 10^{-6} 이하의 값을 가지는 구간에서의 1차 미분계수, 즉 고장률의 순간변화량이 0.01정도의 값을 가지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 2차 미분계수가 10^{-7} 이하의 값을 가지고 있는 구간에서의 고장률의 순간변화량은 0.003~

0.005정도의 값을 보임을 확인 할 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이, 신뢰성 성장구간과 안정화구간을 구분 할 수 있는 기준이 전무한 상태이므로, <Table 3>에서 제시된 고장률의 변화량과 2차 미분계수, 그리고 <Figure 2>에서 도시된 고장률 추세에 대한 시각적 판단 등을 고려했을 때, 국산 훈련기의 항공전자장비의 안정화구간에 대한 판단기준은 고장률추세곡선의 2차 미분계수가 10^{-7} 이하인 점이 적정수준이라 잠정적으로 판단할 수 있었다.

해당 기준값을 적용하면, 조사대상의 항공전자장비의 안정화구간이 5~7만 시간에서 형성되고 있음을 확인할 수 있으며(<Table 3>에서 유색칸), 이는 해당 부품들에 대한 현장실무자들이 일반적으로 예상하고 있는 기간(약 10만 시간)보다 상당히 짧은 수준이다.

본 연구의 잠정적 결과를 적용한다면, 국산 훈련기 운용기간이 5~7만 시간 이상이 되면 초기고장이 어느 정도 해결되고 이후에는 주로 우발고장만이 발생하는 것을 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서 분석한 항공전자장비의 경우, 시스템이 설계, 생산, 평가를 거쳐 개발이 완성된 후 5~7만 시간까지는 신뢰성이 성장하는 구간으로 판단하여 최소 재고만 확보하고 또한 항공기 가동률도 목표가동률보다 낮은 수준에서 유지토록 하다가 5~7만 시간 내에서 안정화 구간을 찾게 되면 목표가동률을 정상화하고 이때의 MFTBF를 활용한 소요예측 활동 등을 통해 적정운용비용 및 재고를 확보하는 정책이 필요하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

지금까지 국내에서 개발된 항공기에 장착된 항공전자장비의 실제 운용자료를 사용하여 해당 장비들의 신뢰성 지표인 MFTBF를 확인하였고, 개발 시 예측한 MFTBF와 운용 MFTBF가 어떠한 차이를 보이는지와 그 연관성이 어느 정도인지를 살펴보았다. 또한 항공전자장비의 누적고장률이 운용시간이 지남에 따라 어떤 추이를 보이는지를 분석해 보았다.

그 결과 예측 MFTBF가 운용 MFTBF에 비해 대체적으로 보수적으로 추정되고 있음을 확인할 수 있었으며, 그 차이가 크게는 3배 이상 존재함을 알 수 있었다. 이는 예측 MFTBF를 실제 운용 시 그대로 사용할 경우 많은 품목에서 과다한 재고보유 등을 초래하여 운영적 낭비가 발생할 수 있음을 시사한다.

또한 일부 항공전자장비의 운용자료를 분석한 결과, 초기 신뢰성 성장 구간과 안정화 구간의 경계선이 어느 정도 뚜렷하게 구분되고 있음을 관찰할 수 있었으며 안정화 이후에는 누적고장률이 거의 변하지 않고 일정함을 알 수 있었다(이는 안정화 이후에는 MFTBF가 일정함을 의미한다).

이상의 결과는 항공기 신뢰성 예측 시 주로 사용하는 Duane[2]의 성장곡선 이론이 항공전자장비의 경우에는 전체 구간보다는 초기 성장구간에 적용되는 것이 오히려 바람직하다고도 볼 수 있다.

본 연구의 기여점은, 기존에 충분한 운용자료의 확보가 어려워 시도해 보지 못한, 국산 항공기에서 사용하는 항공전자장비의 운용자료를 사용한 고장률추세를 통해 신뢰성성장분석을 수행하였고, 운용시간에 따른 MFTBF와의 추세를 분석하였으며, 항공전자장비의 신뢰성 성장구간과 안정화구간의 정의를 통해 막연하게 10만 시간 이후에나 안정화될 것이라는 추측에서 한 단계 더 나아가 구체적 안정화시기를 확인한 것이라 할 수 있겠다. 이는 항공전자장비의 향후 소요예측 및 효율적 재고관리를 위한 참고자료로서 상당한 가치가 있을 것이라 판단된다.

다만, 아직 국산 항공기의 운용기간이 짧아 충분한 운용자료를 확보하고 있지 못한 관계로, 본 연구에서는 소수의 부품만을 대상으로 분석을 실시하였기에 전체 항공전자장비의 신뢰성 안정화구간을 정의하기에는 충분한 정보를 제공하지 못한 점은 추후에 연구대상이다. 그러나 향후 국산 항공기의 운용자료가 충분히 수집된다면 이점은 자연스레 해결될 것이라 기대된다. 특히, 제 3.2절의 마지막에서 언급한 내용처럼, 다양한 품목의 운용자료가 충분히 수집된다면 시스템의 안정화를 판단 할 수 있는 성장기울기의 기준값을 도출하는 연구도 가능하리라 판단된다.

추가적으로, 향후 항전장비 뿐 아니라 유압, 계통장비 등도 운용자료를 사용한 신뢰성분석을 통해 고장추세의 특성을 찾아내어 지속적으로 분석하고 관리할 수 있도록 한다면 전체 항공기의 효율적 운용 및 총 수명관리의 최적화에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] Crow, L.H., Planning a Reliability Growth Program Utilizing Historical Data. *Reliability and Maintainability Symposium, January*, 2011.

[2] Duane, J.T., Learning curee approach to reliability monitoring. *IEEE Transactions on Aerospace*, 1964, Vol. 2, No. 2, 563-566.

[3] Jeon, T.-B., An Overview on the Emergence of the Reliability Prediction Methodology 217PLUS™. *Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl, Univ. Korea,* 2009, Vol. 29, No. A, p 28-36.

[4] Jo, I.-T., Lee, S.-C., and Kim, Y.-H., A Study on Reliability Prediction Comparison of Aero Space Electronic Equipments. *IE Interface*, 2012, Vol. 25, No. 4, 472-479.

[5] Jung, W., Application of Reliability Technology in Products Design and Development, *Proceedings of 2005 Conferences(Spring) on The Korea Industrial and Systems Engineering*, 2005.

[6] Kim, E.-J, Won, J.-H., Choi, J.-H., and Kim, T.-G., A Study on Reliability Assessment of Aircraft Structural Parts. *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 2010, Vol. 18, No. 4, p 38-43.

[7] Lee, Y.-E., Choi, J.-Y., and Kang, J.-Y., Mission Reliability Analysis and Prediction for Aircraft System based on FA-50 Aircraft Development Experience. *Proceedings of 2010 Conference(Fall) on The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2010.

[8] Lee, Y.-E., Kim, K.-Y., Lee, K.-H, Kim, Y.-H., and Jung, Y.-M., Reliability Growth Analysis for KA-1 Aircraft-Based on Duane and Crow-AMSAA Model, *Proceedings of 2010 Conference(Spring) on The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2010.

[9] MIL-STD-756B, Reliability Modeling and Prediction, 1981.

[10] MIL-STD-785B, Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production, 1980.

[11] MIL-HDBK-217F Notice 2, Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense, 1995.

[12] MIL-HDBK-338B, Electronic Reliability Design Handbook, 1998.

[13] MIL-STD-1635, Reliability Growth Testing, 1978.

[14] Moasoft, A Guide Book for Reliability Prediction, 2002.

[15] Raghuram R, HCL, Challenges in Reliability Prediction of Aircraft Subsystems, 2008.

[16] Smith, S.A. and Oren, S.S., Reliability Growth of Repairable Systems. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1980, Vol. 27, No. 4, p 39-547.