

# 항공기 엔진의 신뢰성과 안전성 분석

## Reliability and Safety Analysis for Gas Turbine Engine

방 장 규<sup>1</sup>

한국교통대학교 항공운항학과

### 초 록

항공기 엔진 체계의 신뢰성과 안전성을 분석하는 것은 RAM 분석이라고 한다. RAM은 제작자가 개발한 시스템의 지속가능성 혹은 그 체계의 수명주기비용(Life Cycle Cost)에 중대한 영향을 줄 수 있는 시스템 설계특성을 의미한다. 또한 RAM은 시스템이 개발될 당시에 의도된 임무를 수행할 수 있는 능력 혹은 임수수행을 성공할 수 있도록 담보하는 중요한 역할을 한다. RAM은 1970년대 이후 미국 군수분야에서는 군수지원성분석(LSA, Logistic Support Analysis) 과 밀접히 연계되어 활용되어 왔으며, RAM과 LSA를 통합하여 종합군수지원체계(ILS, Integrated Logistics Support)라고 부른다. 본 연구에서는 항공기 엔진에 대한 신뢰성 분석에 Weibull 분포를 활용하였다. Weibull 분포는 2개의 변수 적용에서 다음과 같이 정의된다. 변수가 그 계의 어떤 값을 나타내느냐에 따라 분포도 곡선의 특성 의미는 변수에 의존된다. 예를 들어 시험성적, 사회적 특성을 표현하는 인지도, 산업 제품의 고장이나 결함을 나타내는 고장관련 모수(변수) 등에 따라 그 특징을 나타내게 된다. 항공기 엔진의 신뢰성 분석을 통해 항공기 엔진의 수명 판단이 가능해졌으며 임무 불가능 수준의 In-Flight Shut-Down 비율이 현격히 감소됨을 확인할 수 있었다.

## 1. 서 론

신뢰도·가용도·정비도 (RAM, Reliability, Availability, Maintenance)는 제작자가 개발한 시스템의 지속가능성 혹은 그 체계의 수명주기비용(Life Cycle Cost)에 중대한 영향을 줄 수 있는 시스템 설계특성을 의미한다. 또한 RAM은 시스템이 개발될 당시에 의도된 임무를 수행할 수 있는 능력 혹은 임수수행을 성공할 수 있도록 담보하는 중요한 역할을 한다[1].

신뢰도는 고장이 발생할 확률과 밀접하게 관련되어 있으며 가용도는 임무를 수행할 수 있는 혹은 수행하기 위해 준비된 상태를 말한다. 정비도는 고장이 발생했을 때 복구할 수 있는 능력뿐만 아니라 사후 발생 가능한 고장을 사전 정비하는 개념까지 포함한다. 이러한 RAM의 사전적 의미 때문에 군수분야에서는 군수지원성분석(LSA, Logistic Support Analysis) 과 밀접히 연계되어 있다[2]. 따라서 RAM과 LSA를 통합하여 종합군

수지원체계(ILS, Integrated Logistics Support)라고 부른다[3].

미국 국방성(DoD, Department of Defense)관련 많은 정부기관에서 획득하는 장비들은 1990년대 이후 RAM 분석을 수행하여 설계수명뿐만 아니라 운용유지비용, 목표수명과 경제수명의 판단 및 도출, 그에 맞게 운용하도록 권고 하고 있다[4]. 왜냐하면 국방과학 분야에서 연구 결과 정부가 획득한 장비들의 고장 발생이 철저한 공학적이고 체계적인 신뢰성 검증이 사전에 이뤄지지 못한 것에 기인하고 있다고 판단했기 때문이다[5]. 국내에서도 이와 같은 미국의 실정을 반영하여 2013년 '무기체계 RAM 업무지침'을 방위사업청 예규1)로 지정하여 시행 중이다.

따라서 본 연구는 다음의 Table 1.에서 제시하는 미국방성 참고문헌들과 규격서 등을 바탕으로 RAM 기법을 적용한 무인항공기 및 그 관련 체계에 대한 연구를 추진하고자 한다. 이를 위해 장비

1) 방위사업청 예규 제156호, '무기체계 RAM 업무지침 (2013.9.10.)

의 운용시간과 연관된 고장, 고장율, RAM-c 분석 및 공학 분야에서 수명 데이터를 분석할 때 사용하는 통계학적 이론인 Weibull 분포도<sup>2)</sup>를 통해 장비의  $B\alpha$ -Life 수명이론을 검증하고 신뢰도가 90%이상인 시점(운용시간)을 중심으로 적정 수명을 판단하고 제시 한다.

Table 1. DoD's Military Standards & Handbooks

신뢰도	<ul style="list-style-type: none"> <li>MIL-HDBK-217F : Reliability Prediction of Electronic Equipment</li> <li>MIL-STD-756B : Reliability Modeling and Production</li> <li>MIL-STD-1530C : Aircraft Structural Integrity Program (ASIP)</li> <li>MIMIL-HDBK-781 : Reliability Testing For Engineering Development, Qualification and Production</li> <li>MIL-HDBK-785 : Reliability Program For Systems and Equipment Development and Production</li> <li>MIL-HDBK-338 : Electronic Reliability Design</li> </ul>
가용도	<ul style="list-style-type: none"> <li>MIL-STD-1472F : Human Engineering</li> <li>MIL-HDBK-470 : Maintainability Program For Systems and Equipment</li> </ul>
정비성	<ul style="list-style-type: none"> <li>MIL-HDBK-470 : Maintainability Program For Systems and Equipment</li> <li>Integrated Logistics Support Handbook</li> </ul>
고장 탐지성	<ul style="list-style-type: none"> <li>MIL-HDBK-338 : Electronic Reliability Design</li> </ul>

## 2. 본 론

### 2.1 엔진의 수명 판단

장비의 수명판단을 위한 요소는 설계에 적용한 요소, 실제 운용한 장비의 고장률, 고장 수리를 위한 운용비용 및 장비의 설계 회사의 개선된 장비의 설계에 따른 운용 장비의 진부화 등이 포함된다. 이러한 요소들을 바탕으로 적정수명 판단절차는 다음의 Fig 1과 같다.

신뢰도는 대상 장비의 실제 운용실적을 기반으로 한 RAM-c 분석을 통해 운용자료 기반의 신뢰도(Reliability)를 얻는다. MTBF(Mean Time Between Failure, 고장간 평균시간), MTBCF

(Mean Time Between Critical Failure ,평균고장임계 시간)운용가용도(Ao : Operational Availability) 등의 적용 변수가 있다.

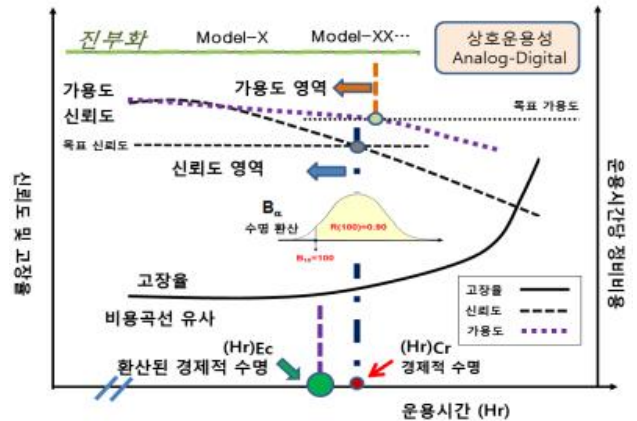


Fig 1. Consideration of a Life Cycle

정비성은 MTTR (Mean Time To Repair, 고장 건당의 정비시간), 불가동시간 분석, 대상장비의 실제 운용비용 자료를 기준으로 하고, 총 소유비용(TOC)은 정비비용으로 반영된 경제성 분석의 기본 자료이다.

장비의 진부화는 대상장비의 주장비 부품뿐만 아니라 구성품에 모두 해당된다. 성능 개선으로 인한 장비의 신모델이 등장함에 따라 기존모델의 부품획득 애로가 발생할 수 있으며, 부품획득 애로가 장기화됨에 따라 구모델과 신모델 간의 상호운용성 미흡, 수리부속의 생산 중단 등 조건이 적용되는 경우를 말한다.

본 연구는 기존의 경제적 수명을 장비의 고장 발생율이 급격히 증가하는 시점, 즉 수리비용이 급격히 증가되는 시점(운용시간)에서 경제적 수명을 결정하고 있다. 본 연구는 이러한 문제점을 보정하기 위하여  $B\alpha$ -수명<sup>3)</sup>이론을 적용한다. 여기서  $B\alpha$ -수명이론에서  $\alpha$ 의 정의는 통계적 분포도 곡선에서 백분율로 표시하는 신뢰도를 나타낸다. 즉 B5-수명이라고 할 때 5의 의미 하는 것은 고장이 10%를 의미 한다. 그러면 신뢰도는 90%가 되는 것이다. 본 이론은 일반 산업의 전자, 기계 장비 및 부품분야 등에서 수명판단을 위

2) Weibull 분포는 수명 데이터 분석에 주로 쓰임. 특히 확률밀도함수를 사용해 부품의 수명을 추정하는데 사용 (wikipedia.org/weibull\_distribution)

3)  $B\alpha$  ; Bruchenzeleitet (initial fracture) 또는 Bearing, (단위 : 시간, 년, 월, km, cycle 등)

한 척도로 이미 적용되는 입증된 이론이다[6].

항공기 엔진의 경제적 수명을 판단할 때 신뢰도가 50%인 시점을 적용하는 것은 장비의 중요도에 비해 낮은 신뢰도이다. 따라서 경제적 수명시점에서 통계적으로 안전성이 보장되는 수명으로 환산보정을 해주는데  $B\alpha$ -Life 수명이론을 적용하는 것이다. 항공기의 경우 B0.1을 Serious Failure, B0.01을 Catastrophic Failure 척도로 사용한다. 항공기와 같이 그 중요도가 높은 장비는 경제적 수명시점에서 신뢰도 50%를 적용하는 장비가 절반이 고장이 발생하여 있다는 것을 의미하기 때문에 신뢰도를 기반으로 엔진체계를 구성하는 요소들을 재판단하는 것이 필요하다.

### 2.2 수명의 구분

장비의 수명 판단과 관련하여 전자 장비의 경우 MIL-STD-217F를 기반으로 하는 신뢰도 적용 방안을 주로 적용하며 항공기 적용의 경우 MIL-STD-1530C에 신뢰도 적용방안이 제시되어 있다.

(1) 설계수명 (Design Life): 장비가 운용하게 되는 환경 조건을 반영하여 그런 운용 조건에서 작동한다고 가정하고 설계 시 분석에 의해 도출된 수명을 뜻한다. 설계조건과 운용 조건이 다르게 되면 장비 수명이 달라진다.

(2) 목표수명 (Objective Life): 설계자가 장비의 수명을 연장하여 사용할 수 있는 수명을 설정하고 이를 도달하기 위하여 고장발생예측, 시간제 부품의 교환, 수리 필요조건관련 부품을 정비 지침을 설정하여 적용한 수명을 뜻한다.

(3) 경제수명 (Economic Life): 장비의 사용에 따라 고장의 발생과 수리시간, 수리비용이 발생하게 된다. 따라서 사용시간에 따른 정비(수리) 비용을 보면 시간의 증가에 따라 비용이 증가하게 되는데 어느 시점에 가게 되면 운용시간당의 정비(수리) 비용이 갑자기 급격하게 증가하게 되는데 이 지점을 경제적 수명에 접어드는 단계라고 할 수 있다.

Fig 2에 제시된 바와 같이 장비의 운용시간이 늘어날수록 신뢰도는 점차 하락하게 된다. 따라서 고장이 발생할 때 마다 정비를 하고 고장발생을 예측하여 필요한 부품과 수리를 병행함으로써 최초 장비가 도입된 a 시점부터 목표신뢰도 시점인 h 시점까지 신뢰도를 향상시켜 장비의 수명을 설계수명보다 연장하여 목표수명까지 도달하게 할 수 있는 것이다.

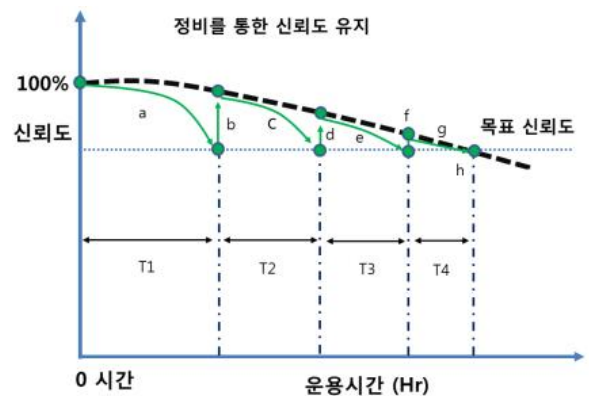


Fig 2. Reliability and Life Cycle

### 2.4 신뢰성 분석 - Weibull 분포

통계학적인 Weibull 분포곡선은 1937년 스웨덴의 공학자이며 과학자인 Waloddi Weibull (1887 ~1979)에 의해 제시된 수학적인 분포도 곡선이다. 이 분포도는 변수의 특성에 따라 다양한 산업분야에 적용이 가능한 통계이론이다[7].

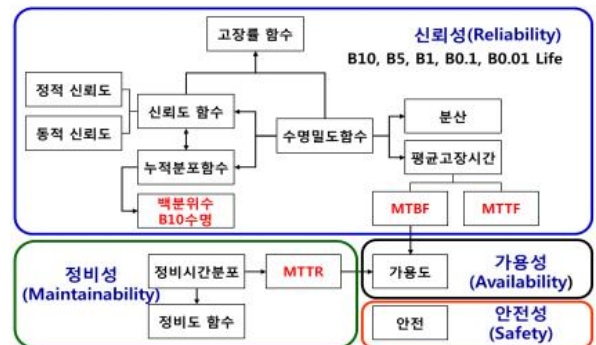


Fig 3. RAM 변수의 연관성

Weibull 분포는 2개의 변수 적용에서 다음과 같이 정의된다. 변수가 그 계의 어떤 값을 나타내느냐에 따라 분포도 곡선의 특성 의미는 변수에 의존된다. 예를 들어 시험성적, 사회적 특성을 표현하는 인지도, 산업 제품의 고장이나 결함을 나타내는 고장관련 모수(변수) 등에 따라 그 특징을 나타내게 된다. 두 개의 변수를 갖는 Weibull 분포의 기계적인 장비 및 전자 부품의 파손 및 결함의 누적밀도함수(CDF: Cumulative Density Function)  $F(t)$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

여기서  $F(t) \geq 0$ , 운용시간  $t \geq 0$  이며,  $\eta$ 는 척도 모수(Scale Parameter), 혹은 특성 수명(Character life),  $\eta > 0$ 이고,  $\beta$ 는 향상모수(Shape parameter), 혹은 기울기(Slope),  $\beta > 0$  이다. 크기 변수  $\eta$  는 적용하는 변수의 값에 대한 크기를 설정해 주며,  $\beta$  는 분포도의 형상을 나타내는 변수로서 분포의 대칭성, 치우침을 보여준다. 그 내용으로 다음의 3 가지 범주로 설명된다[8].

1)  $\beta < 1$  인 경우 대상 장비의 운용 초기에 나타나는 결함의 형태로 초기고장에서 사용이 증가함에 따라 고장이 감소하는 예측 경로이다. 운용 초기 단계이기 때문에 개발 단계에서 적용한다.

2)  $\beta = 1$  인 경우 대상 장비의 운용상에 나타나는 불규칙 파손이 일어나는 경로이며, 이 경로는 운용초기를 지나 정상 운용단계에서 적용한다.

2)  $\beta > 1$  인 경우 대상 장비의 장기간 운용에서 나타나는 고장의 특성을 나타내는 경로이다. 장기간 장비를 사용한 상태에서 장비의 노후화에 의한 고장이 증가하는 단계이다.

장비의 고장율은 다음의 Fig 4와 같이 욱조곡선(Bathtub Curve)으로 표현될 수 있으며[9], 상기 언급한  $\beta$ 는 세 가지 단계별로 욱조커브에 표현할 수 있다.

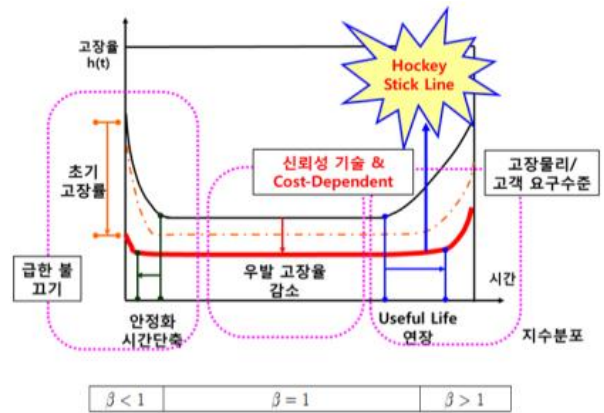


Fig 4. Hazard Function(Bathtub Curve)

### 3. 결론

본 논문에서는 고장율을 기반으로 한 Weibull 고장분포도 함수를 적용하여 엔진의 신뢰성과 안전성<sup>4)</sup>을 판단할 수 있음을 논하였다.

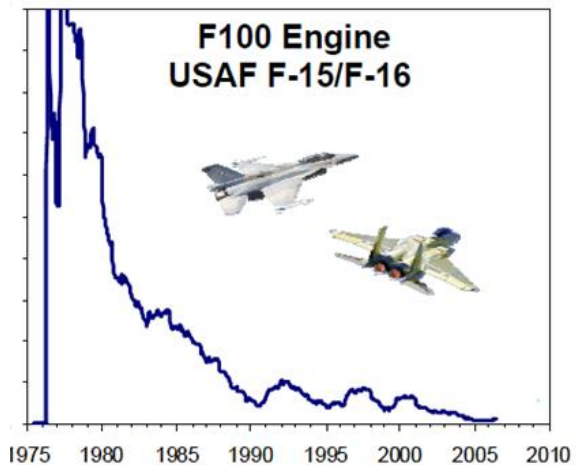


Fig 5. In-Flight Shut-down Rate

항공기 엔진 체계의 설계 사용수명, 및 경제 수명에 대한 검토 결과를 제시할 수 있다. 이상에서와 같이 고장율의 운용 시간당 건수자료와 정비 유지 비용자료를 충분히 확보하고 유지 할 경우 몇 개의 자료를 가지고 고장확률 밀도 함수에 의한 안전수명, 위험도, 신뢰도 분석이 이루어 질

4)Pratt & Whitney, 15th Aero Technology Symposium

수 있음을 확인할 수 있었다. 결과적으로 항공기 엔진의 수명판단을 이루어내고 항공기 엔진의 최적 운용을 위하여 최고의 신뢰성을 담보하는 최적의 적정 수명을 적용할 수 있음을 보여 주었다.

### 참고문헌

- [1] Military Handbook 338, Electronic Reliability Design Handbook, October 1998
- [2] 김무영 (2011), “무기체계 시험개발단계에서의 종합군수지원요소 개발 방안에 대한 고찰”, 대한 산업공학회 추계학술대회
- [3] 최청호 (2013), “무기체계의 신뢰성 기법 적용방안 : 설계/개발 및 운용단계”, 공군본부 총수명주기 체계관리 세미나
- [4] Report of the Defense Science Board Task Force on Developmental Test and Evaluation, May 2008
- [5] Department of Defense Instruction, Number 5000.02, Operation of the Defense Acquisition System, December 2008
- [6] Waloddi Wei-bull (2012), “Reliability Analysis with Wei-bull,” Ed(12), Curt Ullrich Ronniger
- [7] C. B. Guure, N. A. Ibrahim, (2013), “Generalized Bayesian non-Informative Prior Estimation of Weibull Parameter with Interval Censoring”, Science Asia 39(S) pp. 75-79
- [8] J. G. Stotivig, (2014), “Censored Weibull Distribution Data in Experimental Design”, Master of Science Thesis in Physics and Mathematics, Norwegian University of Science and Technology
- [9] Klutke, G., Kiessler, P.C., Wortman, M. A. (2015) "A Critical Look at The Bathtub Curve", IEEE Transactions on Reliability 52 (1), pp.125-129